

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА ИМЕНИ А. Н. БЕКЕТОВА**

**В. Е. Бекетов
Г. П. Евтухова**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

ПРИКЛАДНАЯ АЭРОЭКОЛОГИЯ

Модуль 4 «АППАРАТЫ СУХОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ»

*(для студентов 4-го курса (7 семестр) дневной и 4 курса (8 семестр) заочной
форм обучения направления 6.040106 «Экология, охрана окружающей среды
и сбалансированное природопользование»)*

ХАРЬКОВ – ХНУГХ – 2013

Бекетов В. Е. Конспект лекций по дисциплине Прикладная аэроэкология , модуль 4 «Аппараты сухой очистки газов» (для студентов 4-го курса (7 семестр) дневной и 4 курса (8 семестр) заочной форм обучения направления 6.040106 «Экология, охрана окружающей среды и сбалансированное природопользование») / В. Е. Бекетов, Г. П. Евтухова; Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ, 2013. – 64 с.

Авторы: В. Е. Бекетов,
Г. П. Евтухова,

Рецензент: к.т.н., доц. В. Н. Ладыженский

Рекомендовано кафедрой ИЭ и ЭБГ, протокол № 1 от 30.08.2013г.

© В. Е. Бекетов, Г. П. Евтухова, 2013

© ХНУМГ, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА	5
1.1. ОРГАНИЗАЦИЯ САНИТАРНО-ЗАЩИТНЫХ ЗОН (СЗЗ)	5
1.2. ИНЖЕНЕРНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ	7
1.3. АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ	8
1.4. ВНЕДРЕНИЕ БЕЗОТХОДНЫХ И МАЛООТХОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	10
1.5. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ	10
2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ	12
3. АППАРАТЫ СУХОЙ ИНЕРЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ (ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ)	15
3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГРАВИТАЦИОННОГО И ИНЕРЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ	15
3.2. ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ	16
3.3. ЦИКЛОНЫ	18
3.3.1. Основы теории циклона	20
3.3.2. Практические рекомендации по выбору и расчету циклонов	22
3.4. БАТАРЕЙНЫЕ ЦИКЛОНЫ	25
3.4.1. Расчет батарейного циклона	26
3.5. ЖАЛЮЗИЙНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ (ПЫЛЕКОНЦЕНТРАТОРЫ)	27
3.6. ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ	28
3.7. ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ РОТАЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ (ДИНАМИЧЕСКИЕ, РОТАЦИОННЫЕ, ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ)	29
4. ФИЛЬТРЫ	31
4.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ФИЛЬТРАЦИЕЙ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТОЙ ПЕРЕГОРОДКИ	31
4.2. МЕХАНИЗМЫ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ	34
4.2.1. Механизм касания	35
4.2.2. Инерционный механизм	35
4.2.3. Диффузионный механизм	36
4.2.4. Гравитационный механизм	37
4.2.5. Электростатический механизм	37
4.3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ В ПОРИСТОМ ФИЛЬТРЕ	38
4.4. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТОГО ФИЛЬТРА	39
4.5. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВЫ РАСЧЕТА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ФИЛЬТРОВ	41
4.5.1. Тканевые фильтры	41
4.5.2. Волокнистые фильтры	44
4.5.3. Зернистые фильтры	45
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ	48
5.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ	48
5.2. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ	50
5.2.1. Устройство электрофильтров	51
5.2.2. Расчет эффективности электрофильтров	54
5.2.3. Факторы, влияющие на эффективность электрофильтра	57
5.2.4. Электрическое оборудование электрофильтров	61
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	63

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Прикладная аэроэкология» входит в программу подготовки бакалавра по специальности «Экология и охрана окружающей среды».

В конспекте представлены мероприятия по охране атмосферного воздуха, подробно рассмотрены существующие оценки эффективности систем пыле- и газоочисток, физические основы, механизмы, аппараты и оборудование современных технологий сухой очистки газов: инерционной очистки, фильтрации, электрической очистки. Проанализированы принципы действия аппаратов очистки газов, методы расчета их эффективности, а также их недостатки и преимущества.

Дисциплина дает студенту знания, с помощью которых можно выполнить экологическую оценку состояния атмосферного воздуха и предложить конкретные мероприятия по оздоровлению экологической обстановки.

1. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Мероприятия по охране атмосферного воздуха условно можно разделить на следующие группы:

- 1) организация санитарно-защитных зон.
- 2) инженерно-организационные мероприятия.
- 3) архитектурно-планировочные мероприятия.
- 4) внедрение безотходных и малоотходных технологий.
- 5) применение технических средств и технологии очистки газов.

1.1. Организация санитарно-защитных зон (СЗЗ)

Объекты, являющиеся источниками выделения в окружающую среду загрязняющих (неприятно пахнущих) веществ, следует отделять от жилой застройки санитарно-защитными зонами (СЗЗ).

Размеры СЗЗ до границы жилой застройки устанавливают в зависимости от:

- мощности предприятия;
- условий осуществления технологического процесса;
- характера и количества выделяемых в атмосферу загрязняющих (неприятно пахнущих) веществ.

В соответствии с санитарной классификацией промышленных предприятий установлено пять классов СЗЗ:

Таблица 1.1 – Классы СЗЗ предприятий

Класс предприятия	Размер СЗЗ, м
IA	3000
IB	1000
II	500
III	300
IV	100
V	50

Предприятия с технологическими процессами, не приводящими к выделению в атмосферу загрязняющих веществ, допускается размещать в пределах жилых районов.

Жилую застройку отделяют СЗЗ от:

- железнодорожных линий - 100м от оси крайнего пути;
- морских и речных портов- 100-300м;
- автомобильных дорог: I-III категорий - 100м, IV - 50 м;
- АЗС с подземными резервуарами для хранения топлива - 50 м;
- гаражей и наземных автостоянок - 10 – 50 м;
- станций технического обслуживания- 15 - 50м.

При наличии неблагоприятных условий для рассеивания примесей в атмосфере, при отсутствии или недостаточной эффективности способов очистки

выбросов, невозможности снижения объёма выбросов СЗЗ может быть увеличена, но не более чем в 3 раза.

Размеры СЗЗ могут быть уменьшены при изменении технологии, совершенствовании технологического процесса и внедрении надежных, высокоэффективных пылегазоочистных устройств, что должно быть подтверждено расчётами и лабораторными исследованиями и согласовано в установленном порядке.

СЗЗ нельзя рассматривать как резервную территорию и использовать ее для расширения промышленной площадки.

На территории СЗЗ допускается размещение:

- объектов более низкого класса вредности, чем основное производство;
- складов;
- гаражей;
- автостоянок;
- административных зданий;
- научно-исследовательских лабораторий.

Размер СЗЗ до границы жилой застройки, детских, учебных, лечебных, спортивных, оздоровительных учреждений, объектов зеленого хозяйства, мест отдыха следует устанавливать:

- для предприятий с технологическими процессами, являющимися источниками загрязнения атмосферного воздуха, - непосредственно от источника загрязнения (трубы, шахты, аэрационные фонари зданий, места погрузки-разгрузки сырья);
- для предприятий с технологическими процессами, являющимися источниками шума, вибрации, электромагнитных волн, радиочастот - от зданий, сооружений и площадок, где установлено это оборудование,
- для электростанций, котельных - от дымовых труб;
- для санитарно-технических сооружений, сельскохозяйственных предприятий - от границы объекта.

Территория СЗЗ должна быть благоустроена и озеленена.

При проектировании благоустройства СЗЗ необходимо сохранять существующие зеленые насаждения.

Со стороны селитебной территории надлежит предусматривать полосу древесно-кустарниковых насаждений шириной не менее 50 м, а при ширине зоны до 100 м - не менее 20 м.

Вблизи предприятий высокой вредности наиболее рациональный принцип организации зеленых насаждений - формирование аэродинамической системы, состоящей из зеленых защитных полос и открытых пространств между ними. Полосы целесообразно размещать под углом 60-90° к основному направлению ветра. При этом зона проветривается по многочисленным каналам в горизонтальном направлении. Завихрение воздуха за полосами способствует образованию восходящих потоков и рассеиванию выбросов в наиболее высоких слоях атмосферы. Одновременно защитные полосы и газонные покрытия задерживают пыль и аэрозоли и поглощают вредные газы.

Размеры СЗЗ, установленные «Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів»[3], должны проверяться расчетом загрязнения атмосферы с учетом перспективы развития предприятия и фактического загрязнения атмосферного воздуха.

Когда расчеты не подтверждают размер СЗЗ, необходимо принимать решение об изменении технологии, предусматривающей снижение объема выбросов, перепрофилирование или закрытие предприятия.

Полученные по расчету размеры СЗЗ должны уточняться отдельно для различных направлений ветра в зависимости от результатов расчета загрязнения атмосферы и среднегодовой розы ветров района расположения предприятия:

$$L = L_0 \frac{P}{P_0}, \text{ м}$$

где L - расчетный размер СЗЗ, м;

L_0 - расчетный размер участка местности в данном направлении, где концентрация веществ (с учетом фоновой) превышает 1 ПДК_{м.р.};

P - среднегодовая повторяемость направления ветров рассматриваемого румба, %;

P_0 - повторяемость направлений ветров одного румба при круговой розе ветров, %. Например, при восьмирумбовой розе ветров: $P_0 = 100/8 = 12,5\%$.

Если в соответствии с расчетом размеры СЗЗ получаются больше, чем размеры, установленные «Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів», то необходимо пересмотреть проектные решения и обеспечить выполнение их требований за счет уменьшения количества выбросов, увеличения высоты источников и других мероприятий.

Если после дополнительной проработки не выявлены возможности обеспечения размеров СЗЗ, требуемых санитарными нормами, то размеры принимаются в соответствии с результатами расчета загрязнения атмосферы.

1.2. Инженерно-организационные мероприятия

Основные инженерно-организационные мероприятий состоят в следующем:

1. Снижение интенсивности и организация движения автотранспорта.

Для этого ведется строительство объездных и окружных дорог вокруг городов и населенных пунктов, устройство развязок пересечений дорог на разных уровнях, организация на основных городских магистралях движения по типу "зеленая волна".

2. Увеличение высоты дымовых труб, через которые осуществляются пылегазовые выбросы в атмосферу.

Чем выше труба, тем легче рассеивание газопылевых выбросов в атмосфере. Если дымовая труба высотой 100 м позволяет рассеивать вредные вещества в радиусе до 20 км, то труба высотой 250 м увеличивает радиус рассеива-

ния до 75 км. Самая высокая в мире дымовая труба высотой более 400м построена на медноникелевом комбинате в г. Садбери в Канаде.

Следует учитывать, что при выбросах через высокие дымовые трубы повышается общее фоновое загрязнение воздуха. Кроме того, с увеличением трубы резко возрастает ее стоимость, поэтому на практике не рекомендуется строительство труб высотой более 150 м.

3. Повышение скорости движения газов в дымовой трубе.

Это способствует увеличению начального подъема выбросов, улучшению условий их рассеивания. С другой стороны, при этом возрастет гидравлическое сопротивление дымовой трубы и соответственно удельные энергозатраты на транспортировку газов.

1.3. Архитектурно-планировочные мероприятия

К архитектурно-планировочным относятся мероприятия, связанные с выбором площадки для строительства промышленного предприятия, взаимным расположением предприятия и жилых кварталов, взаимным расположением цехов предприятия, устройством зеленых зон.

Промышленный объект должен быть расположен на ровном возвышенном месте, хорошо проветриваемом ветрами (рис. 1.1).

Площадка жилой застройки **1** не должна быть выше площадки предприятия **2** ($H_2 < H_1$), в противном случае преимущество высоких труб **3** для рассеивания вредных выбросов сводится на нет.

Источники загрязнения атмосферы **3,4** желательно располагать за чертой **5** населенных пунктов и с подветренной стороны от жилых массивов по средней розе ветров теплого периода года **6**, чтобы выбросы уносились в сторону от жилых кварталов.

Расстояние между производственными зданиями при удалении вредных веществ через аэрационные фонари должно быть больше восьми высот впереди стоящего здания, если оно широкое ($l > 8h$), и десяти, если оно узкое ($l > 10h$). В этом случае загрязняющие вещества не будут накапливаться в межкорпусной зоне.

Цехи, выделяющие наибольшее количество загрязняющих веществ, следует располагать на краю производственной территории со стороны, противоположной жилому массиву.

Расположение цехов должно быть таким, чтобы при направлении ветров в сторону жилых кварталов их выбросы **7** не объединялись.

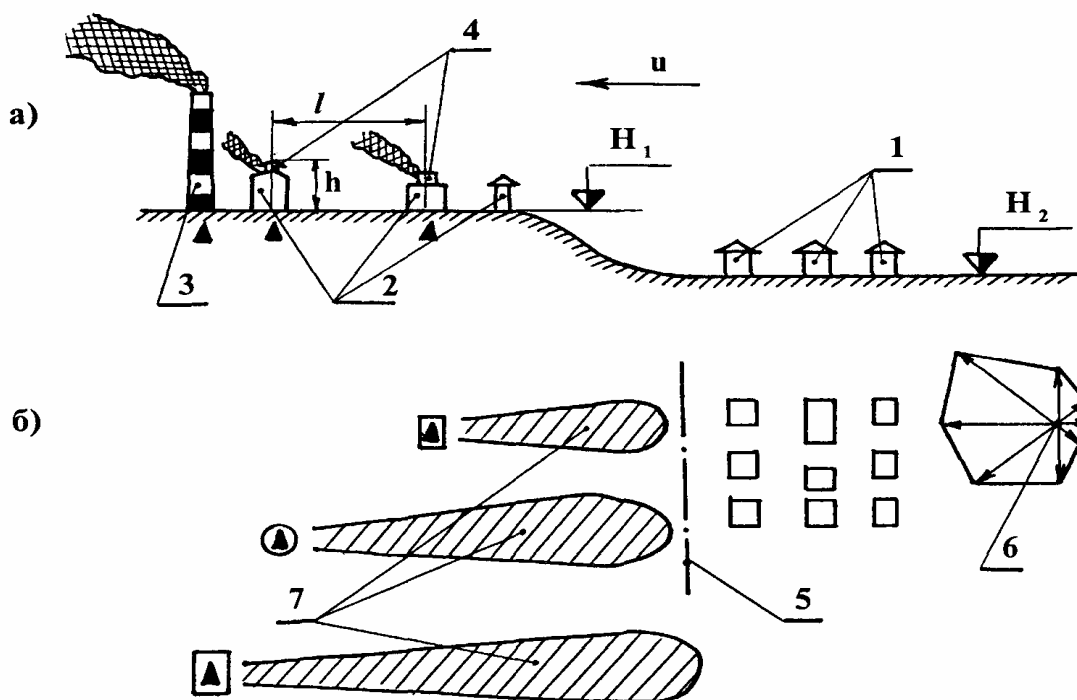


Рис. 1.1 – Рекомендуемые архитектурно-планировочные решения для размещения промышленного объекта, имеющего источники загрязнения атмосферы (а - разрез; б - план):

1 - жилая застройка; 2 - цеха предприятия; 3 - точечный высокий источник; 4 - линейные источники (аэрационные фонари); 5 - граница населенного пункта; 6 - средняя роза ветров теплого периода года; 7 - факелы выбросов загрязняющих веществ в случае ветра в сторону жилой застройки.

Важное место занимают **методы фитомелиорации** с использованием зеленых насаждений (облесение и задернение территорий).

Зеленые насаждения являются незаменимыми биофильтрами. При прохождении запыленного воздуха через кроны деревьев и кустарников, а также через травянистую растительность он механически очищается от пыли благодаря осаждению аэрозольных частиц на поверхности листьев и стеблей растений. Таким образом, происходит процесс естественной фильтрации.

Кроме того, зеленые насаждения могут поглощать газообразные примеси. Например, 10 кг листьев дерева (в пересчете на сухую массу) за период с мая по сентябрь поглощают следующее количество сернистого газа: тополь - 180 г; липа - 100 г; береза - 90 г; клен - 20-30 г.

Для лесостепи поглотительная способность зеленых насаждений составляет 700-1000 кг/га. В северных районах, где количество осадков больше, поглотительная способность зеленых насаждений возрастает.

Если концентрация загрязняющих веществ превышает предельно-допустимую, она становится вредной для жизнедеятельности растений и может привести к их гибели. Наиболее газоустойчивые деревья - акация, дуб, ива, клен.

1.4. Внедрение безотходных и малоотходных технологий

Внедрение безотходных и малоотходных технологий является наиболее эффективным мероприятием, позволяющим коренным образом снизить уровень загрязнения воздушного бассейна урбанизированных территорий и в целом повысить показатели качества жизни населения.

Их разработка требует совместных усилий инженеров-экологов и специалистов-технологов различных направлений. Для реализации таких мероприятий необходимы долгосрочные государственные и международные программы изменения структуры производства и хозяйственной деятельности.

Наиболее перспективными направлениями на сегодняшний день являются:

- Переход энергетики на новые виды топлива, замена угля природным газом. Это позволит существенно снизить уровень загрязнения атмосферы пылью, SO₂.
- Замена автомобилей с бензиновыми двигателями на автомобили с двигателями, работающими на сжатом природном газе, более широкое применение электротранспорта.
- Снижение энергоемкости производства. Повсеместная экономия и сбережение энергоресурсов, использование вторичных энергоресурсов. Для внедрения этих мероприятий Украина имеет широкие перспективы, поскольку в настоящее время энергоемкость единицы продукции в Украине одна из самых высоких в Европе.
- Совершенствование топочного пространства и топливных горелок энергетических котлов, оптимизация процесса сжигания топлива. Это позволит снизить выбросы NO_x, CO в атмосферу.

1.5. Применение технических средств и технологий очистки газов

Применение технических средств и технологий очистки газов на сегодняшний день является основным мероприятием по защите и восстановлению воздушного бассейна урбанизированных территорий.

Причиной этого служит:

- большое количество наработанных технических решений по высокоэффективным аппаратам очистки газов от твердых, жидких и основных газообразных примесей;
- низкий уровень приведенных затрат на очистку газов (в отличие от других групп мероприятий), позволяющий устанавливать аппараты на основных источниках загрязнения атмосферы, добиваться существенного снижения уровня загрязнения воздушного бассейна в городе в короткие сроки;
- возможность вторичного использования уловленного продукта;
- ограниченные размеры аппаратов очистки газов позволяют их устанавливать в верхних ярусах, на свободных площадях действующих объектов без вмешательства в технологический процесс производства и нарушения структуры застройки территории предприятия и прилегающих районов города.

В основу классификации технических средств и технологий очистки газов заложен применяемый способ очистки. Так, для очистки от твердых и жидких частиц применяют методы:

- *сухой инерционной очистки;*
- *мокрой очистки;*
- *фильтрации;*
- *электростатического осаждения;*

для очистки от газо- и парообразных компонентов применяют методы:

- *абсорбции;*
- *адсорбции;*
- *термической очистки;*
- *каталитической очистки;*
- *биохимической очистки.*

Основные требования к газоочистным установкам (ГОУ) – высокая эффективность и эксплуатационная надежность. С увеличением степени требуемой очистки и уменьшением размера улавливаемых частиц увеличиваются капитальные и эксплуатационные затраты на газоочистку. Оптимальный вариант технологии и аппарата очистки определяют по результатам технико-экономической оценки (ТЭО). ТЭО проводится при сравнении внедряемого объекта ГОУ с лучшими действующими аналогами.

ГОУ, как правило, не дают прямой прибыли. Уловленный продукт покрывает лишь часть затрат. Однако, если учитывать предотвращенный ущерб от возможного загрязнения атмосферного воздуха при отсутствии газоочистки, то реальными становятся показатели прибыли и рентабельности ГОУ.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕ- И ГАЗООЧИСТКИ

Оценка эффективности систем пыле- газоочистки проводится по следующим показателям:

Степень (эффективность) очистки газов – отношение количества уловленного загрязняющего вещества (ЗВ) к количеству, поступающему в аппарат на очистку:

$$\eta = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{вх}}} = \frac{M_{\text{вх}} - M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}} = \frac{C_{\text{вх}}Q_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}Q_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}Q_{\text{вх}}} = 1 - \frac{C_{\text{вых}}Q_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}Q_{\text{вх}}},$$

где $M_{\text{вх}}$, $M_{\text{вых}}$, $M_{\text{ул}}$ – соответственно количество уловленного в аппарате, входящего и выходящего из аппарата ЗВ, кг/с;

$C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вых}}$ – концентрация ЗВ в единице объема сухого газа соответственно на входе и выходе из аппарата, г/м³;

$Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}}$ – расход газа соответственно на входе и выходе из аппарата, м³.

При работе газоочистного аппарата без утечек и подсоса воздуха, определив концентрацию загрязняющего вещества относительно единицы объема сухого газа, приведенного к нормальным условиям, степень очистки можно выразить так:

$$\eta = 1 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}}.$$

Коэффициент проскока – отношение количества загрязняющего вещества, выходящего с выбросами из аппарата пылегазоочистки, к количеству, поступившему в него:

$$K_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}} = 1 - \eta.$$

$K_{\text{пр}}$ и η могут быть выражены в долях единицы или в %. Величиной $K_{\text{пр}}$ пользуются в случаях, когда необходимо оценить конечную запыленность или сравнить относительную запыленность газов на выходе из различных аппаратов.

Для определения степени очистки абсолютные значения $Q_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{вых}}$ находить необязательно, достаточно знать их соотношение $Q_{\text{вх}}/Q_{\text{вых}}$.

Степень очистки для частиц пыли различных размеров неодинаковая. Лучше улавливается крупная пыль, чем мелкая. Степень совершенства пылеулавливающего аппарата характеризуется достигаемой с его помощью фракционной (или парциальной) степенью очистки.

Фракционная степень (коэффициент) очистки – отношение количества пыли данной фракции, уловленной в аппарате к количеству входящей пыли той же фракции.

Парциальная степень (коэффициент) очистки – отношение количества частиц данного размера, уловленных в аппарате, к количеству частиц этого же размера на входе в аппарат.

Фракционный коэффициент очистки можно найти как среднее значение парциальных коэффициентов очистки частиц пыли, входящих в данную фракцию. Графическое изображение фракционной и парциальной степени очистки представлено на рис. 2.1.

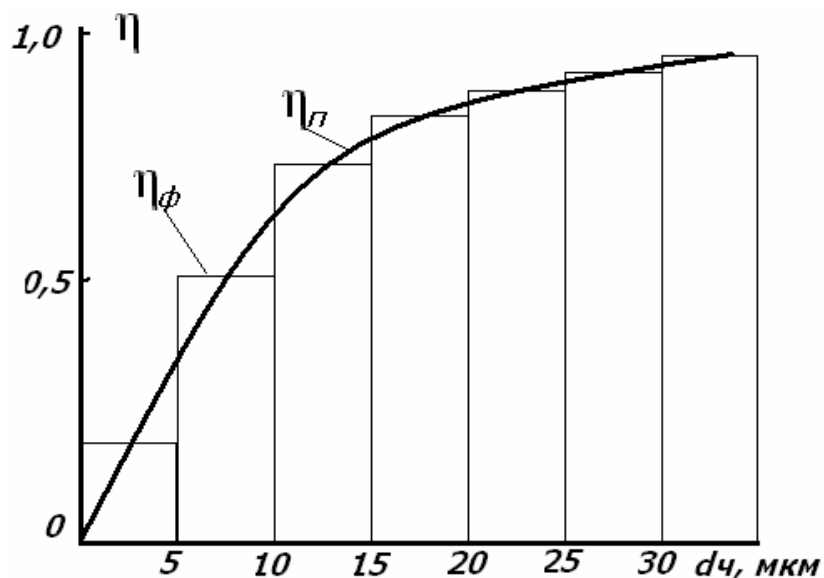


Рис. 2.1 – Зависимость фракционной и парциальной степени очистки от размера частиц

Фракционный η_ϕ и парциальный η_n коэффициенты очистки находят по формулам

$$\eta_\phi = \frac{M_{\phi_{ул}}}{M_{\phi_{вх}}} = \frac{\Phi_{ул} M_{ул}}{\Phi_{вх} M_{вх}} = \eta \frac{\Phi_{ул}}{\Phi_{вх}},$$

где $M_{\phi_{ул}}$ и $M_{\phi_{вх}}$ – масса уловленной фракции и масса фракции на входе в аппарат;

$\Phi_{ул}$ и $\Phi_{вх}$ – содержание данной фракции в уловленной массе пыли и во входящей на очистку массе, %;

$M_{ул}$ и $M_{вх}$ – масса уловленной пыли и масса пыли на входе на очистку;

$$\eta_n = \frac{M_{N_{ул}}}{M_{N_{вх}}} = \frac{N_{ул} M_{ул}}{N_{вх} M_{вх}} = \eta \frac{N_{ул}}{N_{вх}},$$

где $M_{N_{ул}}$ и $M_{N_{вх}}$ – масса частиц данного размера, уловленных в аппарате и на входе в аппарат соответственно;

$N_{ул}$ и $N_{вх}$ – количество частиц (%) данного размера, уловленных в аппарате и на входе в аппарат соответственно.

Зная дисперсный состав пыли и степень очистки по фракциям $\eta_{\phi i}$, можно определить общую степень очистки η :

$$\eta = \eta_{\phi 1} + \eta_{\phi 2} + \dots + \eta_{\phi n} \quad \text{или} \quad \eta = \sum \eta_{\phi} \frac{\Phi_{\phi x}}{100},$$

$$\eta = \sum \eta_n \frac{N_{\phi x}}{100} \Delta d_{\phi}$$

где $\Phi_{\phi x}$ – содержание каждой из фракций на входе в аппарат;

$N_{\phi x}$ – количество частиц данного размера на входе в аппарат.

Последняя формула может быть записана более точно:

$$\eta = \int_0^{\infty} \eta_n \frac{N_{\phi x}}{100} d(d_{\phi})$$

Часто графическая зависимость $\eta_n = f(d_{\phi})$, построенная в вероятностно-логарифмической системе координат, приобретает вид прямой линии, и может быть записана в виде интеграла вероятности:

$$\eta_n = \int_{-\infty}^{\lg d_{\phi} / d_{50}} \frac{100}{\sqrt{2\pi} \times \lg \sigma_{\eta}} \times e^{-\frac{\lg^2 d_{\phi} / d_{50}}{\lg^2 \sigma_{\eta}}} d(\lg d_{\phi} / d_{50}),$$

где $\lg d_{\phi} / d_{50}$ – логарифм отношения текущего размера частиц d_{ϕ} к диаметру частиц d_{50} , осаждаемых с эффективностью 50%;

$\lg \sigma_{\eta}$ – стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов очистки;

Значение d_{50} находят как абсциссу точки графика $\eta_n = f(d_{\phi})$ с ординатой равной 50%, а $\lg \sigma_{\eta}$ – из соотношения:

$$\lg \sigma_{\eta} = \lg d_{84,1} - \lg d_{50},$$

где $\lg d_{84,1}$ – значение абсциссы точки графика $\eta_n = f(d_{\phi})$ с ординатой $\eta_n = 84,1\%$.

Если распределение подлежащих очистке частиц является логарифмически нормальным, то значение полного коэффициента очистки можно найти по формуле

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dx = \frac{1}{2} [\Phi(x) + 1],$$

$$\text{где } x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\phi}}}; \quad t = \frac{\lg\left(\frac{d_{\phi}}{d_m}\right)}{\lg d_{\phi}}.$$

Суммарную степень очистки газов η_{Σ} , достигаемую в нескольких последовательных аппаратах, определяют по формуле

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n),$$

где η_1, η_2, η_n – степень очистки газов соответственно в 1-м, 2-м, ... i-м пылеуловителе.

При этом следует учитывать изменение фракционного состава пыли при переходе к каждому последующему очистному аппарату.

3. АППАРАТЫ СУХОЙ ИНЕРЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ (ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ)

Основным достоинством большинства этих аппаратов является простота конструкции, определяющая возможность их изготовления на неспециализированных предприятиях.

Степень очистки газов в инерционных пылеуловителях часто недостаточна. Поэтому они применяются в качестве первой ступени очистки газов перед более эффективными пылеуловителями.

Осаждение в поле силы тяжести применяют для грубой очистки запыленных газов от частиц размером 30 – 100 мкм; инерционное осаждение 25 – 30 мкм; центробежное - до 5 мкм.

3.1. Физические основы гравитационного и инерционного осаждения

С момента начала движения частицы в вязкой среде (водной или воздушной) возникает сила сопротивления этому движению F_c , которая в соответствии с законом Ньютона выражается следующим образом:

$$F_c = c_x F_q \frac{\rho_z w_o^2}{2}, \text{ н}, \quad (3.1)$$

где w_o^2 - относительная скорость частицы и среды, м/с;

ρ_z - плотность газа, кг/м³;

F_q - площадь сечения частицы, нормальная к направлению движения;

C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для сферических частиц (как и для капель жидкости) $C_x = f(Re)$:

$$Re = \frac{w_o d_r}{\nu_z} = \frac{w_o d_q \rho_z}{\mu_z}. \quad (3.2)$$

Для области ламинарного обтекания $Re \leq 2$:

$$C_x = \frac{24}{Re}. \quad (3.3)$$

Для переходного режима $2 < Re \leq 500$:

$$C_x = \frac{18,5}{Re^{0,6}}.$$

Для турбулентного режима $Re > 500$:

$$C_x = 0,44.$$

В пределах значений $Re \leq 400$ можно пользоваться формулой

$$C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{0,667}}{6} \right).$$

Выражение (3.1) с учетом (3.2) и (3.3) (при ламинарном обтекании) принимает вид

$$F = \frac{24\mu_z}{w_o d_q \rho_z} * \frac{\pi d_q^2}{4} * \frac{\rho_z w_o^2}{2} = 3\pi d_q \mu_z w_o. \quad (3.4)$$

При осаждении частицы на нее действуют сила тяжести F_g и выталкивающая сила F_a :

$$F_g = mg = \rho_q V_q g = \rho_q \frac{\pi d_q^3}{6} g, \quad (3.5)$$

$$F_a = m_z g = \rho_z \frac{\pi d_q^3}{6} g. \quad (3.6)$$

Частица находится в равновесии при условии

$$F_g - F_a - F_c = 0$$

Объединяя (3.4), (3.5), и (3.6) получаем

$$3\pi d_q \mu_z w_o = (\rho_q - \rho_z) \frac{\pi d_q^3}{6} g,$$

откуда

$$w_o = \frac{d_q^2 (\rho_q - \rho_z) g}{18 \mu_z}, \quad (3.7)$$

где w_o – скорость витания частицы – скорость направленного вверх вертикального потока газа, при которой данная частица будет удерживаться в занимаемом ею положении.

Решая уравнение (3.7) относительно d_q , получаем

$$d_q = \sqrt{\frac{18 \mu_z w_o}{(\rho_q - \rho_z) g}}$$

Полученное выражение показывает, что при постоянной плотности ρ_r и вязкости среды μ каждой скорости витания соответствует свой размер частицы.

3.2. Пылеосадительные камеры

Пылеосадительные камеры (ПК) представляют собой простейшие установки для улавливания крупных частиц пыли.

ПК используют в качестве первой ступени очистки газов для улавливания наиболее крупных частиц. Это позволяет избежать осаждения пыли в газоходах и снизить нагрузку на последующие ступени.

Варианты принципиальной схемы пылеосадительных камер приведены на рис. 3.1, а и б.

Максимально допустимая скорость газа в ПК задается исходя из условия отсутствия вторичного уноса пыли. Для различных видов пыли скорость имеет значения от 1,7 до 7,6 м/с и зависит от плотности, размера и формы частиц (табл. 3.1).

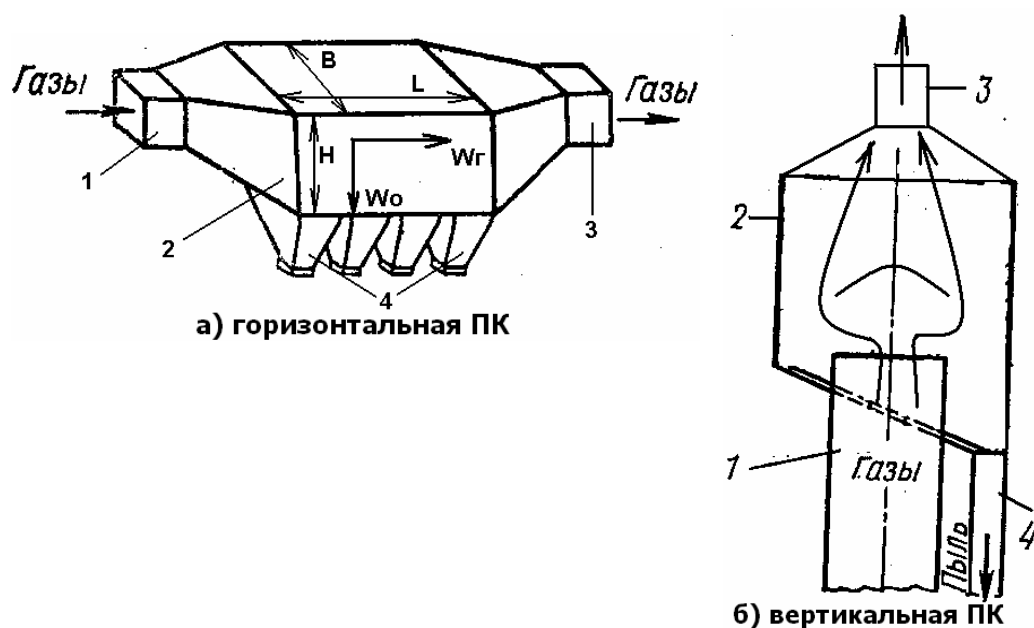


Рис. 3.1 – Пылеосадительные камеры

- 1 – входной патрубок;
 2 – корпус;
 3 – выходной патрубок;
 4 – пылеотводящий бункер.

Таблица 3.1 – Максимально допустимые скорости газов
 в осадительных камерах

Пыль	Плотность частиц, кг/м ³	Среднегеометрический размер частиц, мкм	Максимально допустимая скорость газов, м/с
Асбест	2200	261	5,0
Известняк	2780	71	6,4
Крахмал	1270	64	1,75
Неметаллическая пыль из плавиль- ных печей	3020	117	5,6
Деревянные опилки		1400	6,6

Степень очистки определяется временем пребывания частиц в ПК, что вызывает необходимость увеличения размеров ПК. В наиболее неблагоприятных условиях находятся частицы, расположенные под потолком камеры. Этим частицам для осаждения необходимо пройти путь, равный высоте камеры H (рис. 3.1, а).

При приближенном расчете осадительных камер принимают, что частицы движутся вдоль камеры со скоростью, равной скорости газового потока W_g , и одновременно опускаются вниз со скоростью, равной скорости витания W_0 . Для осаждения частица должна достичь дна раньше, чем газовый поток вынесет ее из камеры. Поэтому время осаждения частицы, в крайнем случае, должно равняться времени пребывания ее в камере.

Время осаждения частицы: $\tau_0 = \frac{H}{W_0}$.

Время пребывания частицы в камере: $\tau_k = \frac{L}{W_z}$.

Граничное условия осаждения частицы ($\tau_0 = \tau_k$):

$$\frac{H}{W_0} = \frac{L}{W_z} \Rightarrow HW_z = LW_0. \quad (3.8)$$

Расход газа:

$$Q_z = FW_z = HBW_z \quad (3.9)$$

Подставляя (3.9) в (3.8), получаем

$$\begin{aligned} \frac{Q_z}{B} &= LW_0 \Rightarrow Q_z = BLW_0; \\ Q_z &= LB \frac{d_q^2 (\rho_q - \rho_z) g}{18\mu_z}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Из формулы (3.10) определяем максимальное количество газа, которое можно пропустить через камеру при условии осаждения частиц диаметром d_q .

Решая обратную задачу, находим диаметр частиц, которые будут осаждаться при пропускании через камеру объема газа Q_r :

$$d = \sqrt{\frac{18\mu_z Q_z}{LB(\rho - \rho_z)g}}. \quad (3.11)$$

Из формул (3.10) и (3.11) видно, что с увеличением площади дна камеры существенно улучшаются условия осаждения. Уменьшение высоты камеры без увеличения площади дна не дает эффекта, поскольку при этом уменьшается поперечное сечение камеры, растет W_r и уменьшается τ_k .

3.3. Циклоны

Циклоны являются одними из самых распространенных пылеулавливающих аппаратов. Они предназначены для улавливания пыли размером 15 ÷ 20 мкм и более.

Работа циклона основана на использовании центробежных сил, возникающих при вращении газового потока внутри корпуса циклона. Это вращение достигается за счет тангенциального ввода газа в циклон или с использованием завихрителя. В результате действия центробежных сил взвешенные в потоке газа частицы пыли отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Газ, освобожденный от пыли, продолжает вращаться, совершает поворот на 180 градусов и выходит из циклона через расположенную на оси выхлопную трубу.

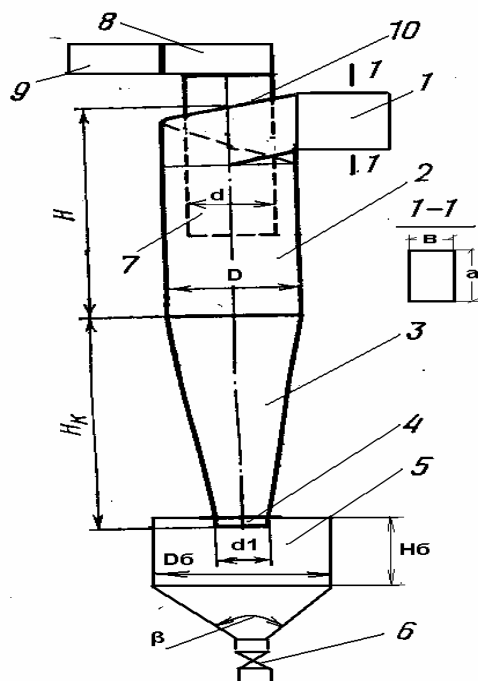


Рис. 3.2 – Схема циклона:

- 1-входной патрубок;
- 2-цилиндрическая часть корпуса;
- 3-коническая часть корпуса;
- 4-пылевывпускное отверстие;
- 5-бункер для пыли;
- 6-пылевой затвор;
- 7-выхлопная труба;
- 8-раскручивающая улитка;
- 9-выходной патрубок;
- 10-наклонная крышка.

Частицы пыли, достигающие стенок корпуса, под действием перемещающегося в осевом направлении вращающегося потока и сил тяжести движутся по направлению к выходному отверстию корпуса и выводятся из циклона.

Наиболее распространенными в странах СНГ являются циклоны конструкции НИИОгаз (Научно-исследовательский институт очистки газов, г. Москва) – ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24. Широкое применение нашли также циклоны ЛИОТ (Ленинградский институт охраны труда) и СИОТ (Свердловский институт охраны труда).

Циклоны ЛИОТ по сравнению с циклонами НИИОгаза имеют удлиненную цилиндрическую часть, глубоко введенную выхлопную трубу и имеют больший угол раскрытия конической части.

Циклоны СИОТ отличаются полным отсутствием цилиндрической части и имеют треугольную форму входного патрубка.

Циклоны НИИОгаз, ЛИОТ, СИОТ нормализованы и любой их размер может быть выражен в долях диаметра.

Основные конструктивные соотношения циклонов зависят от типа выбранного аппарата. Для циклона типа ЦН-15 рекомендуются следующие соотношения:

- внутренний диаметр выхлопной трубы $d=0,59D$, (D - внутренний диаметр корпуса циклона);
- диаметр пылевывпускного отверстия $d_1=0,3\div 0,4D$;
- ширина входного патрубка $b=0,2D$;
- высота входного патрубка $a=0,66D$;
- угол наклона крышки $\alpha=15^\circ$;
- высота цилиндрической части $H=2,26D$;
- высота конуса $H_k=2D$;
- угол наклона стенок бункера $\beta=55\div 60^\circ$;
- диаметр бункера $D_6=1,5D$;
- высота бункера $H_6=0,8D$.

По эффективности пылеулавливания циклоны НИИОгаз, ЛИОТ, СИОТ мало отличаются друг от друга.

Помимо циклонов *возвратно-поточного* типа (к ним относятся все рассмотренные выше циклоны) существуют *прямоточные циклоны*. Прямоточные циклоны отличаются низким гидравлическим сопротивлением, поскольку в них отсутствует поворот газов на 180° . Однако они практически не пригодны для улавливания мелкодисперсной пыли ввиду низкой эффективности.

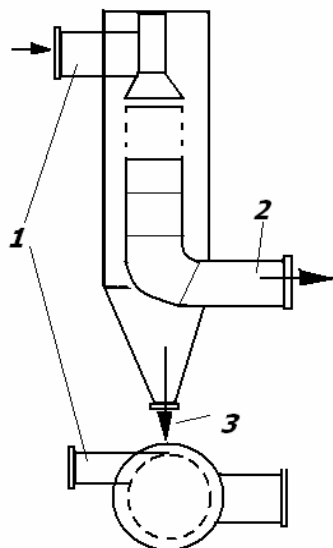
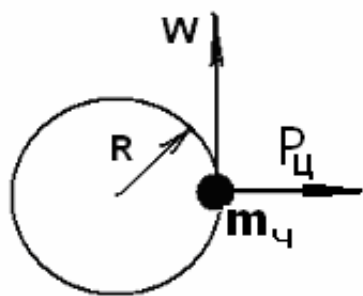


Рис. 3.3 – Прямоточный циклон:
1-тангенциальный вход запыленного газа;
2-выход очищенного газа;
3-выгрузка уловленной пыли.

3.3.1. Основы теории циклона

Рассмотрим частицу пыли массой m_q , вращающуюся в газовом потоке циклона по окружности радиуса R со скоростью W :



$$P_{ц} = \frac{m_q W^2}{R}$$

$$m_q = \frac{\pi d_q^3}{6} \rho_q \Rightarrow P_{ц} = \frac{\pi d_q^3}{6} \rho_q \frac{W^2}{R}$$

Под влиянием центробежной силы $P_{ц}$ частица приобретает скорость в радиальном направлении, встречая при своем движении сопротивление газового слоя.

Рассматривая движение частицы в радиальном направлении в момент, когда сила сопротивления уравнивает центробежную силу, можно записать следующую формулу:

$$\frac{\pi d_q^3}{6} \rho_q \frac{W^2}{R} = 3\pi d_q \mu_z w_o .$$

Из этой формулы выразим скорость частицы, которая может быть достигнута в радиальном направлении:

$$w_0 = \frac{d_q^2 \rho_q W^2}{18 \mu_z R}.$$

Скорость перемещения частицы в радиальном направлении можно записать в следующем виде:

$$w_0 = \frac{dR}{dt}.$$

Объединяя два последних уравнения, имеем

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d_q^2 \rho_q W^2}{18 \mu_z R}.$$

Разделим переменные, получим:

$$RdR = \frac{d_q^2 \rho_q W^2}{18 \mu_z} dt.$$

Проинтегрируем полученное уравнение в пределах от R_1 до R_2 и от 0 до t

(учитывая, что $\int x dx = \frac{x^2}{2}$):

$$\frac{1}{2}(R_2^2 - R_1^2) = \frac{d_q^2 \rho_q W^2}{18 \mu_z} t \Rightarrow (R_2^2 - R_1^2) = \frac{d_q^2 \rho_q W^2}{9 \mu_z} t.$$

Время прохождения частицей пути $(R_2 - R_1)$

$$t = \frac{9 \mu_z (R_2^2 - R_1^2)}{d_q^2 \rho_q W^2}.$$

Диаметр частицы d_q , успевающей за время t пройти путь длиной $(R_2 - R_1)$, равен:

$$d_q = \frac{3 \sqrt{(R_2^2 - R_1^2) \mu_z}}{W \sqrt{\rho_q t}}.$$

Из двух последних формул следует, что эффективность работы циклона возрастает с увеличением скорости газа W , размера d_q и плотности частиц ρ_q пыли и уменьшается с увеличением вязкости газа μ_z и размеров циклона.

Таким образом, определяющие эффективность циклона параметры, зависят от его конструктивных особенностей и свойств пылегазовых выбросов. Например, для циклона ЦН-15 конструкции НИИОгаз (рис. 3.2) параметры имеют следующие значения:

- оптимальная скорость газа – 3,5 м/с;
- диаметр циклона – 0,6м;
- плотность частиц – 1930 кг/м³;
- динамическая вязкость газа – $22,2 \times 10^{-6}$ Па*с;
- d_{50} = 4,5 мкм;

- $lg\sigma_{\eta}=0,352$ – стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов очистки;
- температура очищаемых газов – до 400 °С;
- максимальное давление (разряжение) – 2,5 КПа;
- максимальная концентрация пыли в очищаемом газе – до 400 г/м³;
- максимальный рекомендуемый диаметр – до 1000 мм.

3.3.2. Практические рекомендации по выбору и расчету циклонов

Выбор типа и размера циклона производится на основании заданного расхода газов, физико-химических свойств пыли, требуемой степени очистки, габаритов установки, эксплуатационной надежности и стоимости очистки.

Наиболее характерными нарушениями нормальной работы циклона являются истирание стенок абразивной пылью и залипание. С увеличением диаметра циклона и снижением скорости газового потока на входе истирание стенок и залипание уменьшаются. Поэтому для улавливания абразивной и сильно слипающейся пыли рекомендуется применять циклоны, способные обеспечить необходимую степень очистки при сравнительно небольшой скорости пылегазового потока на входе.

Для снижения потерь давления при улавливании неслипающихся пылей можно использовать регенераторы давления, выполненные в виде лопастных раскручивателей. Они снижают сопротивление аппарата на 18÷25% без ухудшения качества очистки. Дополнительные затраты на установку регенераторов и усложнение конструкции компенсируются снижением эксплуатационных затрат.

Расчет циклонов ведут методом обобщения и использования показателей, получаемых при испытаниях циклонов в промышленных условиях. С помощью этого метода для циклонов различного типа были получены данные для фракционной степени улавливания и коэффициент гидравлического сопротивления для определенных значений скорости очищаемого газа и плотности пыли.

Для расчета необходимы следующие исходные данные:

- количество очищаемого газа (при рабочих условиях) Q_{Γ} , м³/с;
- плотность газа, ρ_{Γ} , кг/м³;
- динамическая вязкость газа, μ_{Γ} , Па*с;
- дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами d_m , мкм и $lg\sigma_{\eta}$;
- запыленность газа на входе в аппарат, $C_{вх}$, г/м³;
- плотность частиц пыли ρ_{η} , кг/м³;
- требуемая эффективность очистки η .

Расчет выполняют в следующей последовательности:

1) задавшись типом циклона, по таблицам из справочной литературы определяют оптимальную скорость газа в аппарате. Для большинства циклонов $W_{опт}=2\div4,5$ м/с. Для ЦН-15 - $W_{опт}=3,5$ м/с;

2) определяют площадь сечения циклона:

$$F = \frac{Q_{\Gamma}}{W_{\text{опт}}};$$

3) определяют диаметр цилиндрической части циклона:

$$D^* = \sqrt{\frac{F}{0,785}}.$$

Диаметр циклона округляют до величины, рекомендованной принятым стандартным рядом диаметров: D=200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 мм;

4) вычисляют действительную скорость газа в циклоне. Эта скорость не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%:

$$W_{\partial} = \frac{Q_{\varepsilon} \cdot 4}{\pi \cdot D^2};$$

5) определяют коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3,$$

где ζ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм; для ЦН-15 $\zeta_{500} = 150 \div 155$;

K_1 - поправочный коэффициент на диаметр циклона;

K_2 - поправочный коэффициент на запыленность газа;

K_3 - поправочный коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группы, $K_3=0$ - для одиночного циклона; $K_3=35$ - для групповой компоновки.

ζ_{500} , K_1 , K_2 , K_3 определяются из таблиц в справочной литературы.

Таблица 3.2.– Поправочный коэффициент K_1 на влияние диаметра циклона

D, мм	Марка циклона		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
450	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблица 3.3.– Поправочный коэффициентов K_2
на запыленность газов ($D=500\text{мм}$)

Марка циклона	Запыленность $10^3, \text{кг/м}^3$						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

б) определяют потери давления в циклоне по формуле

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho W_{\delta}^2}{2}.$$

Если найденные потери давления в циклоне будут приемлемы, далее определяют полный коэффициент очистки в циклоне;

7) по справочным таблицам определяют $d_{50\text{cy}}$ и $\lg \sigma_{\eta\text{cy}}$ (диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью 50% и стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов очистки) для стандартных условий:

$$D_{\text{cy}} = 0,6\text{м};$$

$$W_{\text{cy}} = 3,5 \text{ м/с};$$

$$\rho_{\text{cy}} = 1930 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu_{\text{cy}} = 2,22 \times 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Параметры ЦН-15:

$$d_{50\text{cy}} = 4,50;$$

$$\lg \sigma_{\eta\text{cy}} = 0,352;.$$

8) находят d_{50} при рабочих параметрах...

$$d_{50} = d_{50\text{cy}} \sqrt{\left(\frac{D}{D_{\text{cy}}}\right) \left(\frac{\rho_{\text{cy}}}{\rho}\right) \left(\frac{\mu_z}{\mu_{\text{cy}}}\right) \left(\frac{W_{\text{cy}}}{W}\right)};$$

9) определяют параметр X :

$$x = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\epsilon}}}$$

10) определяют $\Phi(x)$ по таблице [1] и далее находят степень очистки η из следующего соотношения:

$$\eta = \frac{1}{2} [\Phi(x) + 1] .$$

По окончании расчета полученное значение η_p сопоставляют с требуемым η_r . Если окажется $\eta_p < \eta_r$, то необходимо выбрать другой тип циклона с большим коэффициентом гидравлического сопротивления.

Для ориентировочных расчетов необходимого (требуемого) значения $\zeta_{цт}$ рекомендуется следующая зависимость:

$$\zeta_{цт} = \zeta_{цр} \left(\frac{1 - \eta_p}{1 - \eta_t} \right)^2 \frac{W_p D_T}{W_T D_p}.$$

Увеличение диаметра циклона приводит к снижению его эффективности, вследствие чего циклоны типа ЦН диаметром более 1000мм применять не рекомендуется. Это ограничение сильно ограничивает пропускную способность газоочистных установок.

3.4. Батарейные циклоны

Батарейный циклон (мультициклон) (рис. 3.4) представляет собой пылеулавливающий аппарат, состоящий из большого количества параллельно установленных циклонных элементов (рис. 3.5). Циклонные элементы объединены в одном корпусе, имеющих общий подвод-отвод газов и общий сборный бункер.

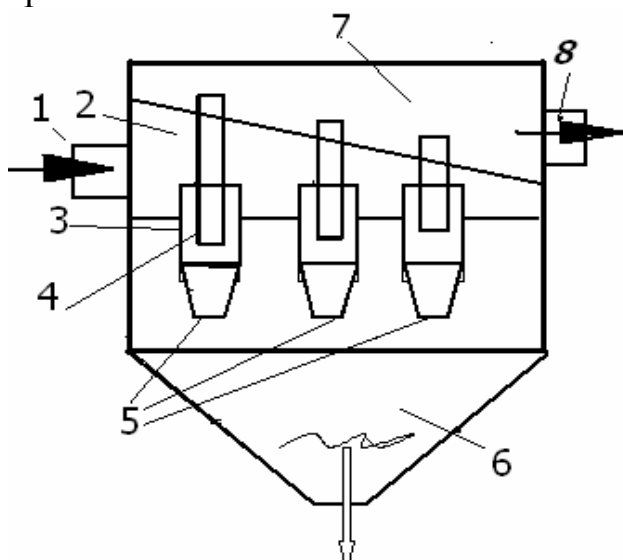


Рис. 3.4 – Схема батарейного циклона:

- 1-входной патрубок;
- 2-газораспределительная камера;
- 3-циклонный элемент (ЦЭ);
- 4-выхлопная труба ЦЭ;
- 5-пылеотводящие отверстия ЦЭ;
- 6-бункер для пыли;
- 7-камера очищенного газа;
- 8-выходной патрубок

Очищаемый в батарейном циклоне газ через входной патрубок 1 поступает в распределительную камеру 2, откуда он входит в кольцевые зазоры между корпусами циклонных элементов 3 и выхлопными трубами 4. В этих зазорах установлены направляющие элементы - лопасти винта или лопатки розетки - закручивающие поток газов. Уловленная пыль через пылеотводящие отверстия 5 поступает в общий бункер 6. Обеспыленный газ через выхлопные трубы 4 поступает в камеру очищенного газа 7 и далее выбрасывается в атмосферу через выходной патрубок 8.

В настоящее время разработаны простые по конструкции циклонные элементы небольшого диаметра (100, 150 и 250 мм) с высокой степенью очистки, которые приспособлены для объединения в большие группы с высокой пропускной способностью – батарейные циклоны.

Для придания вращения газовому потоку внутри циклонных элементов размещены специальные устройства, которые представляют собой двухлопастной винт либо розетку, состоящую из лопаток, установленных под углом к оси.

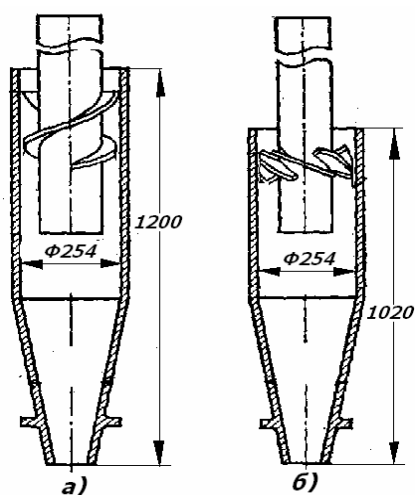


Рис. 3.5 – Схема циклонных элементов:

а - циклонный элемент с направляющим аппаратом типа «винт»;

б - типа циклонный элемент с направляющим аппаратом «розетка».

Угол наклона лопаток в циклонном элементе типа «розетка» (рис. 3.5, б) составляет 25° и 30°. Угол в 25° обеспечивает более высокую очистку, но увеличивает при этом гидравлическое сопротивление.

Использование винта или розетки вместо тангенциального патрубка для закручивания потока позволяет достичь максимальной компактности и удобства компоновки

Большое количество циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, повышает вероятность возникновения *неравномерности распределения газов* по циклонным элементам. Эта неравномерность приводит к перетеканию газа из одних элементов в другие через общий пылевой бункер, ухудшает процесс осаждения пыли, создает предпосылки для забивания пылью завихряющих устройств.

Опыт эксплуатации батарейных циклонов показывает, что эффективность установки в целом обычно на 20-25% ниже эффективности отдельных элементов. Это обусловлено перетоком газов между элементами с различным аэродинамическим сопротивлением.

Для предупреждения перетоков применяют принудительный отбор газов из бункера, что позволяет повысить коэффициент очистки на 5-10%. Отсосные газы очищают в циклоне и дымососом подают во входную камеру циклонных элементов, образуя, таким образом, *контур рециркуляции*.

3.4.1. Расчет батарейного циклона

Рекомендуемая последовательность расчета:

1) определяют расход $q_{\text{опт}}$ газа м³/с, соответствующий оптимальным условиям работы циклонного элемента:

$$q_{\text{опт}} = \frac{\pi D^2 W_{\text{опт}}}{4},$$

где $W_{\text{опт}}$ - оптимальная скорость потока в элементе, м/с (табличное значение);

D - внутренний диаметр элемента, м (выбирают в зависимости от свойств пыли).

2) находят число циклонных элементов для оптимальной работы батарейного циклона:

$$n_{opt} = \frac{Q}{q_{opt}};$$

3) по таблицам выбирают батарейный циклон с ближайшим к n_{opt} количеством циклонных элементов n . Выбранное n не должно отличаться от n_{opt} более чем на 10%. Определяют действительную скорость потока в элементе W (м/с):

$$W = \frac{Q}{n \cdot 0.785 \cdot D^2};$$

4) определяют потери давления в батарейном циклоне, Па:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho_g W^2}{2}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ БЦ берут из таблиц [1];

5) коэффициент очистки газа в элементе батарейного циклона определяют по схеме, аналогичной для обычных циклонов:

а) находят параметр X :

$$x = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\epsilon}},$$

б) определяют $\Phi(x)$ по таблице [1] и вычисляют степень очистки η ;

б) общий коэффициент очистки η^1 с учетом рециркуляции и снижения эффективности на 10% определяют по формуле

$$\eta^1 = \frac{0,9 \eta_\epsilon \eta}{1 - 0,9 \eta (1 - \eta_\epsilon)},$$

где η_ϵ – коэффициент очистки в отсосной линии (контур рециркуляции);
 η – коэффициент очистки в одиночном циклонном элементе.

3.5. Жалюзийные пылеуловители (пылеконцентраторы)

Жалюзийные пылеуловители (рис. 3.6) предназначены для улавливания крупнодисперсной пыли с $d_{ch}=30-40$ мкм. Применяются для очистки промышленных газов и как золоуловители. Эти пылеуловители могут быть использованы в качестве 1-й ступени очистки для предотвращения абразивного износа и снижения нагрузки на последующие ступени.

С помощью жалюзийной решетки, установленной в газоходе и состоящей из ряда пластин, поток газа делится на две части. Большая часть газа (80-90%) огибает пластины и частично, освобождаясь при этом от пыли, продолжает двигаться в первоначальном направлении. Меньшая часть газа (10-20%) обогащенная пылью, отводится для очистки в циклон, после чего присоединяется к основному потоку газа.

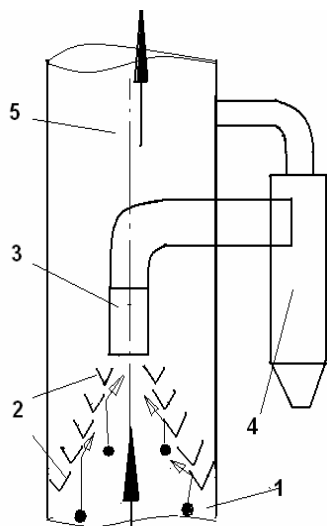


Рис. 3.6 – Схема жалюзийного пылеуловителя:

- 1-вход запыленного газа;
- 2-жалюзи(жалюзийная решетка);
- 3-патрубок отвода газа, обогащенного пылью;
- 4-циклон ;
- 5-выход очищенного газа.

В основе работы жалюзийных пылеуловителей лежит *инерционно-отражательный принцип*. Частицы пыли выпадают из потока при крутом повороте газа в жалюзийной решетке, а также при отражении в результате непосредственного удара о пластины. В обоих случаях частицы попадают в меньшую часть потока, обогащая ее пылью.

Эффективность улавливания пыли η в жалюзийных пылеуловителях зависит от эффективности решетки η_p , эффективности отсосного пылеуловителя (циклона) $\eta_{ц}$ и доли ϕ газа, отсасываемого в циклон:

$$\eta = \eta_{ц} [1 - (1 - \phi)(1 - \eta_p)] .$$

Для прикидочных расчетов можно использовать выражение

$$\eta = 0,8\eta_p .$$

Жалюзийные пылеуловители (золоуловители) характеризуются следующими параметрами (жалюзийный пылеуловитель/(батарейный циклон)):

гидравлическое сопротивление -100÷500 Па;

остаточная запыленность (слоевое сжигание) –1÷2/ (0,2÷0,7)г/м²;

остаточная запыленность (пылевидное сжигание) –5÷7/(2÷3) г/м².

3.6. Инерционные пылеуловители

Инерционные пылеуловители применяются для грубой пылеочисткиходящих газов в качестве первой ступени. Простейшие пылеуловители инерционного действия представлены на рис. 3.7.

Механизм осаждения частиц в инерционных пылеуловителях основан на изменении направления их движения. Так в пылевом мешке с центральным подводом пылегазовый поток проходит вертикально вниз по цилиндрическому газоходу, затем изменяет направление движения на 180° и проходит через кольцевой зазор. Уловленная пыль сыпается в бункер. Эффект пылеулавливания в значительной степени зависит от правильно подобранного кольцевого зазора.

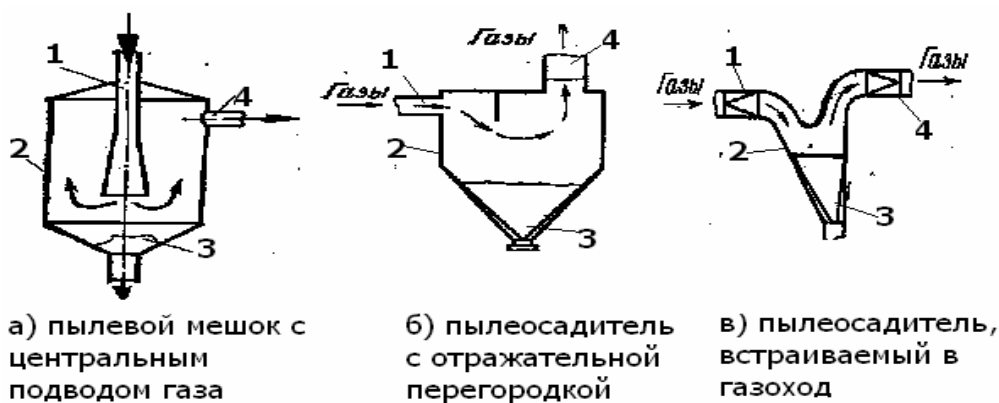


Рис. 3.7 – Простейшие инерционные уловители:
1-входной патрубок; 2-корпус; 3-бункер для сбора пыли;
4-выходной патрубок

Инерционные пылеуловители по сравнению с простой пылесадительной камерой имеют большую эффективность и меньшие габариты за счет добавления к эффекту гравитационного осаждения частиц дополнительного момента движения вниз, равного примерно $g/3$. В пылесадительной камере учитывают только соотношение скорости витания - W_o и скорости газа - W_r : при $W_o > W_r$ частица осаждается в бункер, при $W_o < W_r$ – уносится с потоком.

«Пылевой мешок» применяют в черной и цветной металлургии. W_r в подводящей трубе и в корпусе выбирают в зависимости от вида пыли и желаемой степени очистки - η .

В «пылевых мешках» (устанавливаемых непосредственно за доменными печами) скорость газов в цилиндре мешка принимают 1,0 м/с; во входной цилиндрической трубе - около 10 м/с. Степень улавливания частиц пыли с размерами более 25÷30 мкм достигает 65÷85%. Размеры цилиндрической части мешков - диаметр и высота – составляют 10 м и более. Гидравлическое сопротивление мешков равно 150÷390 Па.

3.7. Пылеуловители ротационного действия (динамические, ротационные, центробежные)

Пылеуловители ротационного действия относятся к аппаратам грубой и полутонкой очистки газов и эффективно улавливают частицы размерами более 10 мкм. Аппараты отличаются большой компактностью, т.к. вентилятор и сепаратор частиц совмещены в одном агрегате.

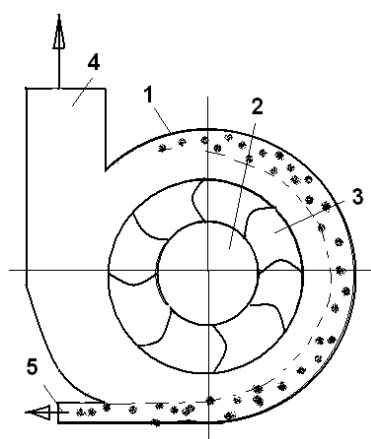


Рис. 3.8 – Схема центробежного пылеуловителя:

- 1-спиралеобразный кожух;
- 2-входной патрубок;
- 3-рабочее колесо;
- 4-выходной патрубок;
- 5-пылеприемный патрубок.

Центробежные пылеуловители ротационного действия состоят из рабочего колеса и кожуха (пылеприемника). Пылегазовая смесь приводится во вращательное движение рабочим колесом. При этом под действием развивающихся сил (центробежной силы и силы Кориолиса) из очищаемого газа выделяется пыль. Частицы попадают на периферию колеса и одновременно перемещаются вдоль ротора в пылеприемный патрубок. Очищенный газ выходит из пылеотделителя через выходной патрубок - патрубок чистого газа.

Из динамических аппаратов наибольшее распространение получили дымососы-пылеуловители (ДП) (рис. 3.9) для улавливания частиц размером более 15 мкм. ДП применяют для очистки газов малых котельных, в литейном производстве, на асфальтобетонных заводах для очистки газов от сушильных барабанов.

Запыленный газ через патрубок (1) поступает в улитку ДП. Под действием центробежных сил частицы перемещаются к стенке улитки. Очищенный газ через патрубок и рабочее колесо поступает в выхлопную трубу (2). Пылевой концентрат через патрубок (3) уходит в контур рециркуляции газа. Контур рециркуляции газа включает в себя циклон ЦН-15 (4) и крыльчатку, размещенную в улитке дымососа. Из циклона пыль поступает в пылеприемник через герметичный бункер, а очищенный поток газа возвращается в центральную часть улитки ДП.

ДП могут работать при температуре до 400 °С и входящей запыленности 100÷200 г/м³. Основной их недостаток - быстрый износ улитки и элементов контура рециркуляции при работе на абразивных пылях.

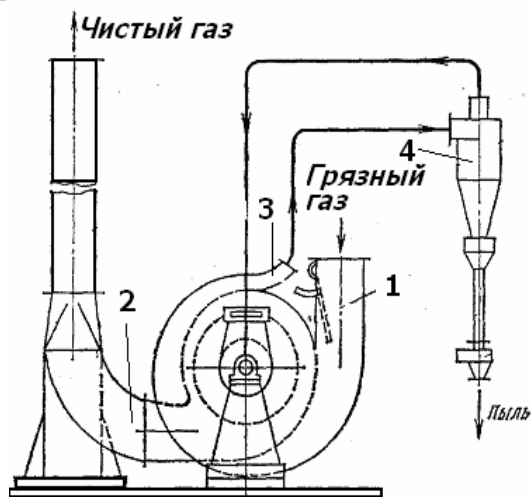


Рис. 3.9 – Схема дымососа-пылеуловителя:

- 1-вход газа на очистку;
- 2-выход очищенного газа;
- 3-отбор пылевого концентрата;
- 4-циклон рециркуляции ЦН-15

Степень очистки в ДП определяют по формуле:

$$\eta = \frac{\eta_{\text{ц}} \eta_{\text{ул}}}{1 - \eta_{\text{ул}} (1 - \eta_{\text{ц}})}$$

где $\eta_{\text{ц}}$ - степень очистки газа в циклоне;

$\eta_{\text{ул}}$ - степень очистки газа в улитке.

Приведенная формула для расчета степени очистки справедлива при условии, что степень рециркуляции газа составляет не менее 15%.

4. ФИЛЬТРЫ

В основе работы пористых фильтров всех видов лежит фильтрация запыленного газа через пористую перегородку. В процессе фильтрации частицы пыли, взвешенные в газе, задерживаются перегородкой, а газ беспрепятственно проходит через нее.

Фильтры с достаточной эффективностью могут задерживать частицы любого размера.

В зависимости от типа фильтра и вида улавливаемой пыли частицы могут:

- а) накапливаться во всем объеме фильтра;
- б) оседать на лобовой поверхности перегородки, образуя фильтрующий пылевой слой.

Скорость процесса фильтрации определяется перепадом давления на пористой перегородке. По мере накопления на фильтре частиц пыли скорость фильтрации постепенно снижается. При достижении предельного значения скорости перегородку необходимо подвергать регенерации – освобождать от уловленной пыли.

В качестве пористых перегородок могут быть использованы:

- 1) ткань;
- 2) бумага;
- 3) волокнистый материал;
- 4) керамика;
- 5) металлическая сетка;
- 6) зернистый слой.

Как правило, размеры поровых каналов превышают размеры улавливаемых частиц. Улавливание частиц, проникающих вглубь фильтрующего материала, происходит за счет осаждения их на стенках каналов, где они удерживаются силами адгезии.

Если размер частиц больше размера порового канала, имеет место *ситовой эффект*.

Большинство фильтров работают в *режиме нестационарной фильтрации*: вследствие оседания пыли на фильтрующей перегородке меняется ее гидравлическое сопротивление и степень очистки. Это обстоятельство сильно осложняет расчеты и эксплуатацию фильтров.

4.1 Физические основы очистки газов фильтрацией. Характеристики пористой перегородки

Пористость(ϵ) равна отношению пустого пространства (объема пор) между твердыми непроницаемыми элементами пористой среды к общему объему, занятому пористой средой.

Пористость является основной характеристикой пористой перегородки и определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = \frac{V - V_{\text{м}}}{V} = \frac{M / \rho - M / \rho_{\text{м}}}{M / \rho} = \frac{1 / \rho - 1 / \rho_{\text{м}}}{1 / \rho} = \frac{(\rho_{\text{м}} - \rho) / \rho \rho_{\text{м}}}{1 / \rho} = \frac{\rho_{\text{м}} - \rho}{\rho_{\text{м}}}$$

где $V_{\text{пор}}$ – объем пор фильтрующего материала (пористой среды);

V – объем фильтрующего материала;

M – масса фильтрующего материала;

ρ – кажущаяся плотность фильтрующего материала;

$\rho_{\text{м}}$ – истинная плотность фильтрующего материала.

Плотность упаковки(α) – величина объема твердых элементов фильтрующей перегородки, заключенная в единице объема пористой среды:

$$\alpha = \frac{V_{\text{м}}}{V} = 1 - \varepsilon;$$

Для описания процесса фильтрации воспользуемся понятием «идеальный материал» - сечение капиллярных каналов цилиндрическое, каналы параллельны между собой.

Рассмотрим единичный объем идеального фильтрующего материала. Диаметр порового канала равен $d_{\text{э}}$, толщина материала – l (рис. 4.1.).

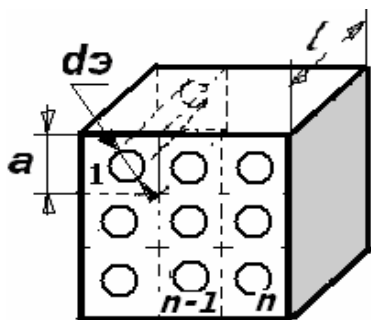


Рис. 4.1 – Единичный объем идеального фильтрующего материала.

Разобьем его на « n » элементарных участков со стороной « a ». Пористость фильтрующего материала можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = \frac{\pi d_{\text{э}}^2 l \cdot n}{4 a^2 l \cdot n} = \frac{\pi d_{\text{э}}^2}{4 a^2} = \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{элуч}}} = f_0, \quad (4.1)$$

где f_0 – относительное живое сечение поровых каналов.

Относительная поверхность поровых каналов (S) – суммарная поверхность поровых каналов в единице объема фильтрующего материала:

$$S = \frac{\pi d_{\text{э}} l \cdot n}{a^2 l \cdot n} = \frac{\pi d_{\text{э}}}{a^2}.$$

Выразим значение ε , используя полученное выражение для S :

$$\varepsilon = \frac{\pi d_{\text{э}}^2}{4 a^2} = \frac{\pi d_{\text{э}}}{a^2} \frac{d_{\text{э}}}{4} = S \frac{d_{\text{э}}}{4}.$$

Отсюда выразим d_p :

$$d_p = \frac{4\varepsilon}{S}.$$

Число поровых каналов n в единице объема равно:

$$n = \frac{S}{S_1}; \quad , \quad \text{или} \quad n = \frac{V_m}{V_{m1}},$$

где S_1 – поверхность одного порового канала;

V_m – объем фильтрующего материала в единице объема фильтра;

V_{m1} – объем фильтрующего материала в одном элементарном участке.

Отсюда следует:

$$S = nS_1 = \frac{V_m}{V_{m1}}S_1.$$

Учитывая, что

$$\alpha = 1 - \varepsilon = \frac{V_m}{V_0} = V_m,$$

получаем

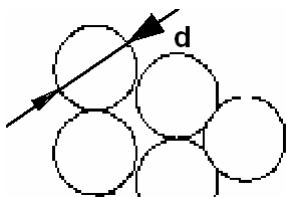
$$S = \frac{1 - \varepsilon}{V_{m1}}S_1,$$

где $V_0 = 1$ – величина единичного объема фильтрующего материала.

С учетом этого получаем выражение для диаметра порового канала:

$$d_p = \frac{4\varepsilon}{S} = \frac{4\varepsilon V_{m1}}{(1 - \varepsilon)S_1} \quad (4.2)$$

Рассмотрим фильтрующий материал, состоящий из частиц сферической формы:



$$V_{m1} = \frac{\pi d^3}{6}; \quad (3.3)$$

$$S_1 = \pi d^2. \quad (3.4)$$

Подставив выражения (4.3) и (4.4) в (4.2), определим эквивалентный диаметр пор фильтрующего материала, состоящего из частиц сферической формы:

$$d_p = \frac{4\varepsilon \pi d^3}{6(1 - \varepsilon)\pi d^2} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon d}{(1 - \varepsilon)}. \quad (4.5)$$

Из (4.5) следует, что эквивалентный диаметр пор увеличивается с увеличением диаметра сферических частиц.

Скорость фильтрации – (w_ϕ)- условная скорость, равная отношению объемного расхода газа, проходящего через фильтр, к полной площади фильтрующей перегородки:

$$w_\phi = \frac{Q_z}{F}$$

Численно скорость фильтрации равна *газовой нагрузке* фильтра – объему газа, проходящего через единицу поверхности фильтра в единицу времени [$\text{м}^3/\text{м}^2\text{с}$].

Фактическая скорость газа в поровом канале больше скорости фильтрации и зависит от пористости фильтрующей перегородки:

$$w = \frac{Q_z}{F_{отв}}, \quad (4.6)$$

где $F_{отв}$ – суммарная площадь отверстий в фильтрующей перегородке.

Из уравнения (4.1) имеем:

$$F_{отв} = f_0 F; \quad f_0 = \varepsilon. \quad (4.7)$$

Подставив (4.7) в (4.6), получим:

$$w = \frac{Q_z}{\varepsilon F} = \frac{w_\phi}{\varepsilon}.$$

Пылеемкость – количество пыли, задерживаемое фильтром за период непрерывной работы (между двумя регенерациями).

Критерием пылеемкости является *интенсивность роста удельного сопротивления* - U :

$$U = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{M_1},$$

где ΔP_1 и ΔP_2 – начальное и конечное сопротивление фильтра, Па;

M_1 – удельная запыленность фильтра – количество пыли, уловленной единицей поверхности, $\text{кг}/\text{м}^2$.

При улавливании мелких частиц пылеемкость фильтра оказывается всегда меньше, чем при улавливании крупной пыли.

4.2. Механизмы процесса фильтрации

Осаждение частиц пыли на твердых элементах пористой перегородки происходит при столкновении движущейся в потоке частицы пыли с элементами фильтрующего слоя. Механизм столкновения частицы пыли может быть разным. Эффективность действия различных механизмов осаждения определяется *коэффициентом захвата*.

Коэффициент захвата (η_z) – отношение площади сечения набегающего пылегазового потока ($F_{оч}$), из которого все частицы полностью осаждаются на

фильтрующем элементе, к площади проекции элемента (F_3) на плоскость, нормальную к направлению движения потока:

$$\eta_3 = \frac{F_{оч}}{F_3}.$$

В большинстве случаев η_3 определяют по формулам, использующим как теоретические, так и экспериментальные данные.

Частицы, взвешенные в газовом потоке, осаждаются в пористых средах за счет нижеследующих эффектов (механизмов).

4.2.1. Механизм касания

Если частица движется по линии, проходящей возле твердого элемента фильтра на расстоянии, меньшем или равном радиусу частицы, она непременно коснется этого элемента и удержится на нем (рис. 4.2).

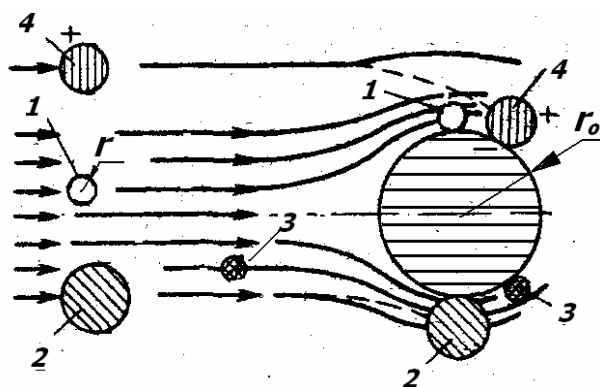


Рис. 4.2 – Схема механизмов процесса фильтрации:

- 1 - механизм касания;
- 2 - инерционный механизм;
- 3 - диффузионный механизм;
- 4 - электростатический механизм.

Определяющий параметр эффекта касания R :

$$R = \frac{r}{r_0},$$

где r - радиус частицы;

r_0 - радиус твердого элемента (волокна) фильтра.

Для обтекания одиночного цилиндра (волокна фильтра) коэффициент захвата за счет касания будет равен:

а) для вязкого обтекания ($Re \leq 2$):

$$\eta_R = \frac{1}{2(2 - \ln Re)} - \left[2(1 + R) \ln(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1 + R} \right];$$

б) для потенциального обтекания ($Re > 500$):

$$\eta_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R},$$

где Re - число Рейнольдса, отнесенное к обтекаемому цилиндру.

4.2.2. Инерционный механизм

При обтекании волокна фильтра линия тока искривляется. Частица пыли, сохраняя в силу инерции прямолинейное движение, смещается с линии тока, направляется к поверхности твердого элемента и оседает на нем (рис. 4.2).

Определяющий параметр инерционного осаждения – *критерий Стокса* - характеризует отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе сопротивления среды:

$$Stk = \frac{wd^2 \rho_p}{18 \mu d_0}$$

где d_p – диаметр частицы;

w – скорость обтекания препятствия;

ρ_p – плотность пыли;

μ – динамический коэффициент вязкости, н с/м²;

d_0 – определяющий диаметр твердого элемента фильтра.

Коэффициент захвата за счет сил инерции для одиночного цилиндра (волокна) выражают следующей формулой:

$$\eta_{Stk} = \frac{S_{Stk}^3}{S_{Stk}^3 + 1,54 S_{Stk}^2 + 1,76}$$

Для частиц диаметром более 1 мкм инерционный механизм имеет решающее значение.

4.2.3. Диффузионный механизм

За счет неуравновешенных ударов молекул, находящихся в броуновском движении, происходит смещение мелких частиц с линий тока и осаждение их на обтекаемых препятствиях (рис. 4.2). Чем мельче частицы и меньше скорость тока, тем сильнее действует этот эффект. Диффузионный механизм преобладает при осаждении частиц диаметром менее 0,5 мкм.

Средний квадрат теплового смещения частицы в данном направлении ($\overline{X^2}$) определяется уравнением Эйнштейна:

$$\overline{X^2} = 2D_0 t$$

где D_0 – коэффициент диффузии;

t – время.

Коэффициент диффузии резко уменьшается с увеличением размера частиц. Поэтому диффузионный эффект довольно значителен для частиц с размерами менее 0,1 мкм.

Коэффициент захвата за счет диффузии для одиночного цилиндра определяется по формуле Ленгмюра

$$\eta_D \approx 2,16 \left[\frac{1}{2(2 - \ln Re)} \right]^{1/3} Pe^{-2/3},$$

где Pe – критерий Пекле, характеризует относительную роль конвекции и диффузии в осаждении частицы на поверхности волокна:

$$Pe = \frac{2rw}{D},$$

где D – диффузионный параметр;

r – радиус частицы.

Из приведенных уравнений следует, что эффективность диффузионного осаждения возрастает с уменьшением размеров частиц и скорости фильтрации.

4.2.4. Гравитационный механизм

Захват частиц может осуществляться под действием силы тяжести.

Коэффициент захвата для одиночного горизонтально расположенного поперек потока цилиндра при вертикально направленном потоке газа можно найти из выражения

$$\eta_G = \frac{w_o}{w_z} = \frac{d^2 \rho_c g}{18 \mu_z} * \frac{1}{w_z} * \frac{w_z d_o}{w_z d_o} = \frac{d^2 \rho_c w_z}{18 \mu_z d_o} * \frac{1}{\frac{w_z^2}{2 g r_o}} = \frac{S_{tk}}{Fr} = G$$

(числитель и знаменатель домножаем на « $w_z d_o$ »),

где $w_o = \frac{d^2 \rho_c g}{18 \mu_z}$ – установившаяся скорость падения частицы (витания);

w_z – скорость газового потока;

$Fr = w_z^2 / 2 g r_o$ – критерий Фруда, характеризует соотношение инерционных и гравитационных сил;

S_{tk} – критерий Стокса, характеризует соотношение инерционных сил и сил сопротивления среды;

G – седиментационный параметр.

При горизонтальном течении газа

$$\eta_G = G^2.$$

Гравитационный механизм начинает играть существенную роль при низких скоростях фильтрации – менее 0,05 см/с.

4.2.5. Электростатический механизм

Если волокно фильтра несет электростатический заряд или поляризовано внешним электрическим полем, то оно создает вокруг себя неравномерное электрическое поле. Частицы пыли поляризуются этим полем и притягиваются к поверхности волокна (4 на рис.4.2).

Коэффициент электростатического захвата определяем по формуле:

$$\eta_E = \frac{E_0^2 r^2}{6 w \mu r_0},$$

где E_0 – напряженность электрического поля у поверхности волокна, н/Кл

Коэффициент электростатического захвата растет с увеличением напряженности электрического поля и размера частиц и уменьшается с увеличением скорости фильтрации.

Суммарный коэффициент захвата η_Σ находим по формуле

$$\eta_\Sigma = 1 - (1 - \eta_R)(1 - \eta_{Stk})(1 - \eta_D)(1 - \eta_E)(1 - \eta_G)$$

На практике при определении η_Σ выделяют и учитывают механизмы захвата, вносящие наиболее существенный вклад в процесс осаждения частиц. Влиянием второстепенных механизмов осаждения в первом приближении пренебрегают.

4.3. Аналитическое определение степени очистки в пористом фильтре

В общем виде степень очистки в пористом фильтре определяют в следующей последовательности.

Количество фильтрующих элементов в единице объема пористого материала (n) равно:

$$n = \frac{V_m}{V_{m1}} = \frac{V_m}{V} \frac{V}{V_{m1}} = \alpha \frac{V}{V_{m1}}.$$

Количество частиц (N_q^1), уловленных одним волокном за единицу времени, находим из уравнения

$$N_q^1 = \eta_\Sigma F_1 W Z,$$

где F_1 - площадь сечения одиночного фильтрующего волокна;

W - фактическая скорость газа в порах между фильтрующими элементами;

Z - счетная концентрация – количество частиц, содержащихся в единице объема.

Учитывая, что $W = W_\phi / \varepsilon = W_\phi / (1 - \alpha)$, получаем:

$$N_q^1 = \eta_\Sigma F_1 \frac{W_\phi}{1 - \alpha} Z.$$

Количество частиц, улавливаемых единицей объема фильтрующего материала за единицу времени, равно:

$$N_q = \alpha \frac{V}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 \frac{W_\phi}{1 - \alpha} Z.$$

Изменение счетной концентрации частиц за время $d\tau = dh/w_\phi$ можно записать в форме материального баланса частиц пыли при прохождении пористой перегородки через единицу площади толщиной dh :

$$-dzV = N_q d\tau = \alpha \frac{V}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 Z \frac{W_\phi}{(1 - \alpha) W_\phi} dh,$$

где $h = w_\phi \tau$ - путь, проходимый частицей за время τ .

После сокращения величин V и W_ϕ получаем

$$-dz = N_q d\tau = \alpha \frac{1}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 Z \frac{1}{(1 - \alpha)} dh.$$

Физический смысл этого уравнения сводится к тому, что убыль частиц в потоке газа, проходящем через фильтрующий слой, равна суммарному количеству частиц, уловленному всеми фильтрующими элементами этого слоя.

Разделим переменные:

$$-\frac{dz}{z} = \frac{\alpha}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 \frac{1}{(1 - \alpha)} dh.$$

Проинтегрируем по счетной концентрации Z от Z_0 до Z и по толщине пористого материала h от 0 до H . С учетом $\int_{Z_0}^Z \frac{dZ}{Z} = \ln Z - \ln Z_0$ получаем

$$-\ln Z_0 + \ln Z = \ln \frac{Z}{Z_0} = -\frac{\alpha}{V_{m1}} \eta_{\Sigma} F_1 \frac{1}{(1-\alpha)} H.$$

Пропотенцируем полученное уравнение и получим выражение для коэффициента проскока:

$$\frac{Z}{Z_0} = \exp \left(-\frac{\alpha}{V_{m1}} \eta_{\Sigma} F_1 \frac{1}{(1-\alpha)} H \right).$$

Полученное выражение для K_{np} можно записать в следующем виде:

$$K_{np} = \frac{Z}{Z_0} = e^{-\psi \eta_{\Sigma}},$$

где $\psi = \frac{\alpha F_1 H}{V_{m1} (1-\alpha)}.$

При n слоях фильтра общий проскок будет равен:

$$K_o = K_1 K_2 K_3 \dots K_n = K^n.$$

Общая степень очистки может быть рассчитана по формуле

$$\eta_o = 1 - K_o = 1 - (1 - \eta)^n.$$

Полученные выражения являются приближенными, т.к. ими не учитывается *струйный характер поступления газа из слоя в слой, турбулизация газового потока* в фильтре и *изменение фракционного состава* пыли от слоя к слою. Кроме того, фильтрующий слой представляет собой совокупность беспорядочно расположенных фильтрующих элементов. Вследствие этого *поле скоростей в реальном фильтре сильно отличается* от поля скоростей вокруг изолированного фильтрующего элемента.

Тем не менее выведенные выше формулы дают возможность приблизительного анализа эффективности многослойного фильтра.

4.4. Гидравлическое сопротивление пористого фильтра

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, в пористых фильтрах в большинстве случаев режим движения газов является ламинарным. Вследствие этого для определения гидравлического сопротивления пористой перегородки можно использовать закон Пуазейля:

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \mu \cdot l \cdot w}{r_p^2},$$

где ΔP – потеря давления в трубке - поровом канале, Па;
 μ – коэффициент динамической вязкости среды, Па с;
 l – длина порового канала, м;
 w – скорость газа в поровом канале, м/с;
 r_p – радиус порового канала, м.

Согласно закону Пуазейля (закон ламинарного течения вязкой жидкости в тонкой цилиндрической трубке) объемный расход через поперечное сечение трубки равен: $V = \pi r^4 \Delta P / 8 \mu l$. В то же время расход, выраженный через площадь сечения и скорость движения среды W , равен: $V = \pi r^2 W l$. Из уравнения: $\pi r^4 \Delta P / 8 \mu l = \pi r^2 W l$ получаем формулу для определения ΔP - гидравлического сопротивления в трубке.

Потери давления пористого фильтра

$$\Delta P = \frac{8 \mu l w}{r_p^2} . \quad (4.8)$$

Запишем формулу (4.2) для определения d_p – диаметра порового канала в виде

$$d_p = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon l}{(1 - \varepsilon)} = \sigma l , \quad (4.9)$$

$$\sigma = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} .$$

где

Суммарную эквивалентную длину порового канала l выразим через толщину фильтрующего материала H :

$$l = a^2 H , \quad (4.10)$$

где a – коэффициент извилистости пор, учитывает увеличение длины канала по сравнению с толщиной слоя и эквивалентную длину местных сопротивлений порового канала.

Фактическую скорость газа в поровом канале выразим через скорость фильтрации:

$$W = \frac{W_\phi}{1 - \alpha} . \quad (4.11)$$

Подставив в уравнение (4.8) уравнения (4.9), (4.10) получим:

$$\Delta P = \frac{8 \mu a^2 H W_\phi}{(1 - \alpha) \sigma^2 r^2} = \frac{8 a^2}{(1 - \alpha) \sigma^2} * \frac{\mu W_\phi H}{r^2} = K \frac{\mu W_\phi H}{r^2} ,$$

где $K = \frac{8 a^2}{(1 - \alpha) \sigma^2}$ - коэффициент сопротивления пористой среды, для каждого типа фильтра определяется соответствующими полуэмпирическими формулами.

В общем виде пористую перегородку можно представить состоящей из двух слоев: первый слой – сама пористая перегородка с осажденными на стенках порового канала частицами пыли; второй слой – слой уловленных частиц, накапливающихся на лобовой поверхности фильтра.

С течением времени сопротивление обоих слоев изменяется (увеличивается): первого – в связи с уменьшением пористости, второго – в связи с увеличением толщины.

Общую потерю давления на фильтре можно представить как сумму потерь давления в каждом из слоев:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = K^I \frac{\mu W_\phi H_1}{r_1^2} + K^{II} \frac{\mu W_\phi H_2}{r_2^2}. \quad (4.12)$$

Потерю давления в первом слое можно представить в следующем виде:

$$\Delta P_1 = A \mu W_\phi,$$

где A – коэффициент зависит от пористости, геометрических и аэродинамических характеристик фильтрующего слоя, пылеемкости первичного слоя фильтра.

Потерю давления в образующемся лобовом слое пыли можно представить в виде:

$$\Delta P_2 = B M_2 \mu W_\phi,$$

где M_2 – масса пыли, осевшей на 1 м^2 площади фильтра;

B – коэффициент зависит от пористости, геометрических и аэродинамических характеристик образующегося вторичного слоя пыли.

Общая потеря давления на фильтре с учетом вышеизложенного составит:

$$\Delta P = \mu W_\phi (A + B M_2). \quad (4.13)$$

Численные значения коэффициентов A и B определяют опытным путем.

4.5. Назначение, устройство, принцип действия, техническая характеристика и основы расчета различных типов фильтров

4.5.1. Тканевые фильтры

В тканевых фильтрах применяют *обычные ткани*, получаемые на ткацких станках, и *войлоки (фетры)*, получаемые сволачиванием и механическим перепутыванием иглопробивным способом. Фильтры используют для очистки от аэрозолей отходящих газов плавильных печей в металлургии, в стекольной и керамической промышленности, печей обжига, установок сжигания мусора, котельных установок.

Наиболее распространенным типом тканевого фильтра является рукавный фильтр. Корпус фильтра разделен на несколько камер (рис. 4.3), в каждой из которых размещено по несколько рукавов.

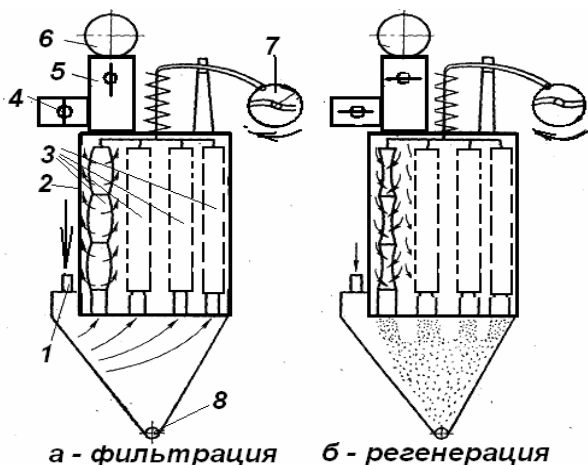


Рис. 4.3 – Схема работы рукавного фильтра:

- 1-входной патрубок;
- 2-корпус фильтра;
- 3-рукава;
- 4-клапан воздушного патрубка;
- 5-клапан выходного патрубка;
- 6-коллектор очищенных газов;
- 7-привод механизма встряхивания;
- 8-пылевывозное устройство.

Запыленный газ поступает в нижнюю часть камеры, через патрубок 1 и подводится внутрь рукавов 3. Фильтруясь через ткань, газ собирается в камере корпуса 2, и при закрытом клапане 4 и открытом клапане 5 отводится в коллектор очищенных газов 6.

Частицы пыли оседают на внутренней поверхности рукавов 3. Их сопротивление при этом постепенно увеличивается. Когда оно достигает некоторого предельного значения – фильтр переводится в режим регенерации.

Существует два основных способа регенерации:

- а) встряхивание фильтрующих элементов (механическое, аэродинамическое, акустическое);
- б) обратная продувка воздухом фильтрующих элементов.

При регенерации обратной продувкой продувочный воздух от специального вентилятора через патрубок при открытом клапане 4 поступает внутрь камеры корпуса 2 (выпускной клапан 5 при этом закрыт). Фильтруясь через рукав в обратном направлении, продувочный воздух разрушает слой пыли, осевшей на поверхности рукава. Для повышения эффективности регенерации рукава встряхивают при помощи специального механизма встряхивания. Пыль ссыпается в бункер через пылевыгрузочное устройство 8. Отработавший продувочный воздух через подводящий патрубок 1 поступает в газопровод грязного газа.

Камеры фильтра переводят в режим регенерации по очереди. Следовательно, из «*n*»-установленных камер в работе всегда находится «*n-1*» камера.

В начальный период работы фильтра пыль осаждается на волокнах ткани. Далее на лобовой стороне фильтра формируется сплошной *вторичный слой* из частиц, которые не могут проникать внутрь ткани. Слой начинает задерживать частицы, толщина его постепенно растет и он становится главной фильтрующей средой. Поры между частицами лобового слоя и сами частицы имеют близкие размеры, поэтому главную роль в процессе очистки начинает играть *ситовой эффект*. Непроницаемость вторичного пылевого слоя для частиц объясняет высокую степень очистки газов в тканевых фильтрах.

Снижение эффективности очистки фильтра всегда связано с динамическим пробоем вторичного слоя и проскоком пыли в местах его разрушения. Это происходит при вибрациях газового потока и установки.

Классифицируют тканевые фильтры по следующим признакам:

- в) по виду используемой ткани;
- г) по способу регенерации;
- д) по числу секций в установке (однокамерные и много камерные);
- е) по форме корпуса (цилиндрические или прямоугольные);
- ж) по месту расположения вентилятора (всасывание-нагнетание);
- з) по форме фильтровальных элементов (рукавные, плоские).

К тканям, используемым в качестве фильтровального материала, предъявляются следующие требования:

- 1) высокая пылеемкость и способность к удерживанию после регенерации необходимого количества пыли;
- 2) высокая воздухопроницаемость в запыленном состоянии;
- 3) способность к легкому удалению накопленной пыли;

- 4) низкая стоимость;
- 5) высокая механическая прочность;
- 6) высокая термостойкость и стойкость к агрессивным средам.

Материала, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям, не существует. Каждый из материалов используется в определенных, наиболее благоприятных для него условиях.

Наиболее широко используемыми фильтровальными тканями являются: хлопчатобумажные; шерстяные; нитроновые; лавсановые; стеклоткани; нетканые материалы (фетры, войлок).

Наибольшее распространение в промышленности получили рукавные фильтры со следующими характеристиками:

- диаметр рукава 135-220 мм;
- длина рукава 2,4-3,4 м;
- максимальная степень очистки 99,9%;
- оптимальная скорость фильтрации 0,5-1 м/с;
- аэродинамическое сопротивление 750-1500 Па.

Для расчета рукавных фильтров Лейбовичем и Пейсаховым предложена формула, позволяющая найти гидравлическое сопротивление в любой момент времени t :

$$\Delta P = \frac{817 W_{\phi} \mu (1 - \varepsilon_n)}{d_m^2 \varepsilon_n^3} \left(\frac{581 \times 10^{-6} (1 - \varepsilon_n) d_m^{0.23}}{\varepsilon_T^{3.24}} + \frac{Z_1 W_{\phi} t}{\rho_n} \right),$$

где W_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с;

μ – динамический коэффициент вязкости газа, н с/м²;

ε_n – пористость слоя пыли;

ε_T – пористость ткани;

d_m – средний размер частиц пыли, м;

ρ – плотность пыли, кг/м³;

Z_1 – начальная запыленность газа, кг/м³.

Значение коэффициентов А и В для формулы (4.13) равны:

$$A = \frac{0,475(1 - \varepsilon_n)^2}{d_m^{1,77} \varepsilon_n^3 \varepsilon_T^{3,24}}, \quad B = \frac{817(1 - \varepsilon_n)}{d_m^2 \varepsilon_n^3 \rho_n}.$$

Количество пыли, накопленное на единице площади фильтра за время t , равно:

$$M_2 = Z_1 W_{\phi} t. \quad (4.14)$$

Необходимую продолжительность периода между регенерациями t определяют при совместном решении двух уравнений - (4.13) и (4.14):

$$t = \frac{\frac{\Delta P}{\mu W_{\phi}} - A}{B W_{\phi} Z_1}.$$

Количество газа, проходящего через ткань, находим по формуле

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^1 + fW_{np}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где V_{Γ}^1 – объемный расход газа, подводимого к фильтру;

W_{np} – скорость воздуха при обратной продувке, м/с;

F – поверхность рукавов, размещенных в одной секции, м².

Необходимая общая поверхность рукавов всех секций равна:

$$F = \frac{V_{\Gamma}}{W_{\phi}} + f.$$

Необходимое число секций составляет:

$$n = \frac{F}{f}.$$

4.5.2. Волокнистые фильтры

Волокнистые фильтры (набивные, маты, из картона, бумаги и др.) представляют собой пористые перегородки (слои различной толщины), составленные из беспорядочно расположенных волокон (рис. 4.4). Волокна равномерно распределены по объему и каждое из которых принимает участие в осаждении аэрозольных частиц. Это *фильтры объемного действия*, поскольку рассчитаны на улавливание и накапливание частиц по всей своей глубине

Волокнистые фильтры предназначены для очистки от пыли *слабозапыленных* потоков воздуха с концентрацией пыли *не более 5 мг/м³*, для очистки атмосферного воздуха в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха.

В связи с высокой пористостью ($\epsilon \leq 0,1$) аэрозольные частицы легко проникают вглубь материала. Поэтому регенерация отработанных фильтров затруднена и нерентабельна. По окончании срока службы отработавшую фильтрующую среду, как правило, заменяют новой.

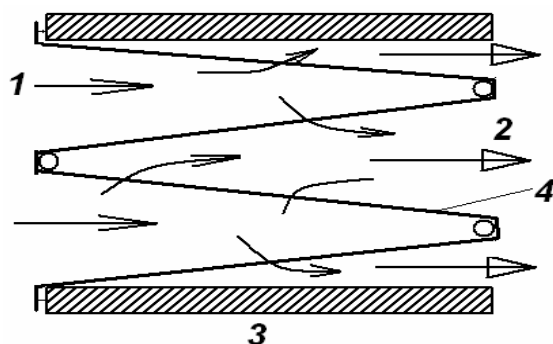


Рис. 4.4 – Схема секции волокнистого фильтра:

1-вход газа;

2-выход газа;

3-боковая стенка;

4-фильтрующий материал.

Для создания фильтрующих перегородок используют как естественные, так и специально подготовленные волокна толщиной 0,01÷100 мкм (отходы текстильного производства, шлаковую вату, стекловолокно и т.п.).

Основные характеристики волокнистых фильтров:

- Скорость фильтрации 0,01÷0,1 м/с;
- Гидравлическое сопротивление (чистый фильтр) 200÷300 Па;

- Гидравлическое сопротивление (забитый пылью фильтр) $700 \div 1500$ Па;
- Степень очистки для мелкодисперсных частиц – $\geq 99\%$;
- Удельная поверхность фильтрования $100 \div 150$ м²/1м³.

Коэффициент проскока K_{np} волокнистых фильтров определяют по формуле

$$\lg K_{np} = -\frac{0,87\alpha H \eta_{\Sigma}}{\pi r_o \beta},$$

где α – плотность упаковки;

η_{Σ} – суммарный коэффициент захвата;

r_o – размер твердого элемента фильтра;

β – коэффициент неоднородности структуры фильтра, $\beta = 1 \div 2$.

Гидравлическое сопротивление ΔP волокнистых фильтров в пределах ламинарного режима движения ($Re=0,5 \div 1$) прямо пропорциональна скорости фильтрации:

$$\Delta P = \Delta P_1 \frac{W_{\phi}}{W_1},$$

где ΔP_1 – сопротивление фильтра при стандартной скорости $W_1 = 1$ см/с;

W_{ϕ} – скорость фильтрации.

Ввиду того, что лобового слоя в волокнистых фильтрах не образуется, аэродинамическое сопротивление определяется одним слагаемым формулы (4.12):

$$\Delta P_1 = K^1 \frac{\mu W_{\phi} H_1}{r_1^2}.$$

Для вычисления коэффициента сопротивления пористой среды в настоящее время различными авторами предложено много полуэмпирических формул:

Формула Лангмюра:
$$K^1 = \frac{2\alpha\beta}{-0,5 \ln \alpha + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} - 0,75};$$

Формула Девиса:
$$K^1 = 16\alpha^{1,5} (1 + 56\alpha^3).$$

4.5.3. Зернистые фильтры

В *зернистом фильтре* фильтрующий слой состоит из зерен различной формы (сферы, кольца, гранулы, куски и т.п.). Фильтрующим материалом зернистого фильтра могут быть: песок, щебень, шлак, дробленая горная порода, опилки, крошка резины, графита, пластмассы, стандартные виды насадок (кольца Рашига, седла Берля, сферы и т.д.).

Преимущества зернистых фильтров:

- 1) низкая стоимость, доступность материалов, возможность применения для очистки высокотемпературных газов (до $500\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) в условиях агрессивной среды при резких изменениях давления и температуры;
- 2) возможность применения для улавливания слипающихся, высокоомных, абразивных пылей, когда затруднено применение аппаратов другого типа;
- 3) возможность возврата в технологический процесс уловленного на фильтре продукта (например: фильтрующий слой состоит из зерен шихты сырья и уловленной пыли).

Зернистый слой в фильтре может быть использован:

- в качестве фильтрующей перегородки для очистки газов от твердых частиц;
- в качестве катализатора или сорбента при каталитической и сорбционной очистке газов.

Различают следующие типы зернистых фильтров:

- 1) *зернистые насадочные (насыпные) фильтры*, в которых улавливающие элементы не связаны жестко друг с другом;

К ним относят:

- а) статические (неподвижные) слоевые фильтры;
 - б) динамические (подвижные) слоевые фильтры с гравитационным перемещением сыпучей среды;
 - в) псевдоожиженные слои;
- 2) *жесткие пористые фильтры*, в которых зерна прочно связаны друг с другом спеканием, прессованием, склеиванием (пористая керамика, пористые металлы, пористые пластмассы).

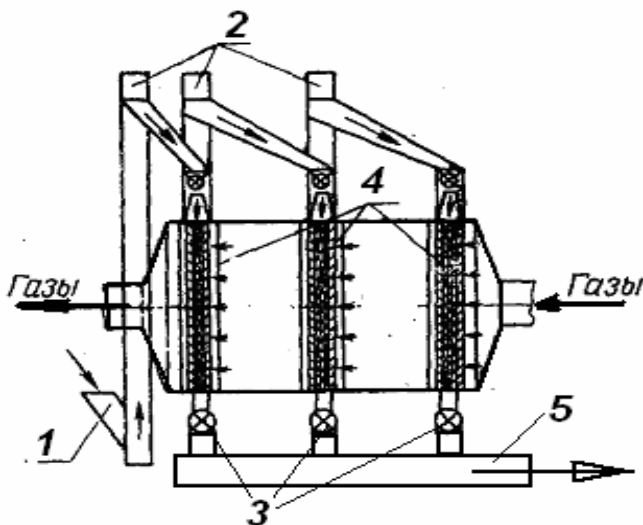


Рис. 4.5 – Фильтр с движущимися слоями зернистого материала:

- 1-короб для подачи свежего зернистого материала;
2-питатели;
3-затворы;
4-фильтрующие слои;
5-короб для вывода запыленного материала.

В настоящее время зернистые фильтры широкого распространения не получили из-за сложности их эксплуатации.

В зависимости от вида улавливаемой пыли зернистые фильтры могут иметь следующие параметры:

- степень очистки 95-99,5%;
- гидравлическое сопротивление 1300-3000 Па;
- скорость фильтрации 15-35 м/мин.

Для определения коэффициента проскока в зернистом фильтре используют уравнение

$$K = e^{\beta H Re^{\frac{\delta}{d_{\text{экв}}}}},$$

где H – толщина слоя, м;

Re – число Пекле;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр зерен насадки, м;

β и δ – константы, зависящие от характеристик зерен фильтрующего слоя.

Гидравлическое сопротивление слоя рассчитывают по формуле

$$\Delta P = \lambda \frac{HW_{\phi}^2 \rho_g}{2d_{\text{экв}} \Phi^{3-n}} \frac{(1-\epsilon)^{3-n}}{\epsilon^2},$$

где ϵ – пористость слоя;

λ – коэффициент сопротивления, $\lambda = f(Re)$;

Φ – коэффициент формы зерен слоя: $\Phi=0,8$ -для гальки и песка;

$\Phi=0,7$ -для щебня и гравия; $\Phi=0,5 \div 0,5$ -для колец Рашига;

ρ_g – плотность газа, кг/м³;

n – показатель степени, $n=f(Re)$.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

5.1. Физические основы электрической очистки газов

Процесс электроочистки можно разделить на следующие стадии:

- 1) зарядка взвешенных в газе частиц;
- 2) движение заряженных частиц к электродам;
- 3) осаждение частиц на электродах;
- 4) удаление осажденных частиц с электродов.

Основой процесса электроочистки является образование между электродами электрофильтра коронного разряда, который характерен для системы электродов с резко *неоднородным полем*.

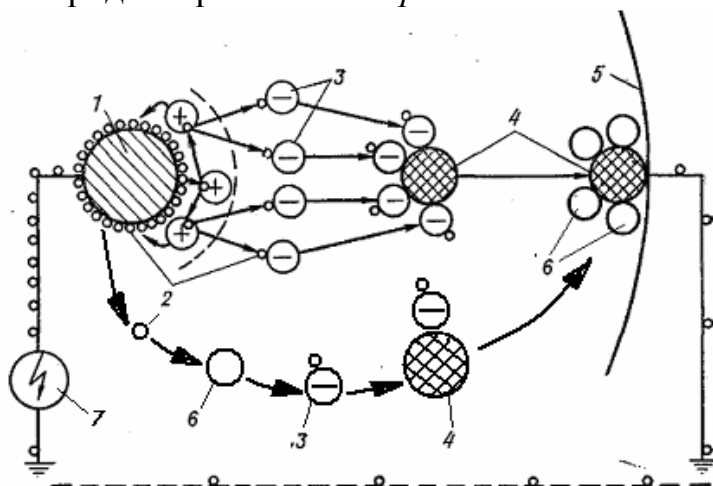


Рис. 5.1 – Механизм зарядки и осаждения частиц в электрофильтре:

- 1-коронирующий электрод;
- 2-электроны;
- 3-ионы;
- 4-частицы пыли;
- 5-осадительный электрод
- 6-молекулы газа;
- 7-агрегат электропитания.

Схема процесса электрической фильтрации газов представлена на рис. 5.1. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему из осадительных (заземленных) и коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения.

При достаточно большом напряжении, приложенном к межэлектродному промежутку, у поверхности коронирующего электрода происходит интенсивная ударная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда – *короны*. Корона на весь межэлектродный промежуток не распространяется и затухает по мере уменьшения напряженности электрического поля в направлении осадительного электрода.

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам. Вследствие этого в межэлектродном промежутке возникает электрический ток, называемый *током короны*. Улавливаемые частицы *адсорбируют* на своей поверхности ионы, приобретая при этом электрический заряд. Под влиянием сил электрического поля частицы движутся к электродам и осаждаются на них. Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов. По мере накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой электродов водой.

Коронный разряд возникает при достижении определенной напряженности электрического поля, называемой *начальной или критической*. Например,

критическая напряженность для воздуха при атмосферном давлении и температуре 20°C составляет около 15 кВ/см.

Критическое напряжение определяет начало возникновения коронного разряда на электрофилтре. С увеличением на электродах напряжения выше критического возрастает напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве и соответственно увеличивается ток короны. При этом в нормально работающем электрофилтре интенсифицируются процессы зарядки и осаждения частиц, т.е. возрастает эффективность их улавливания.

Однако, напряжение на электродах может быть поднято до определенного значения. При достижении этого значения электрическая прочность газового промежутка между электродами будет нарушена искровым или дуговым электрическим разрядом – наступит *пробой* межэлектродного пространства.

Критическое напряжение коронного разряда для системы, состоящей из трубчатого осадительного электрода и гладкого проволочного коронирующего электрода определяется формулой

$$U_0 = E_0 R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (5.1)$$

где U_0 – критическое напряжение, В;

E_0 – критическая напряженность электрического поля, В/м;

R_1 – радиус коронирующего электрода, м;

R_2 – радиус трубчатого осадительного электрода, м.

Из формулы (5.1) следует, что с уменьшением радиуса коронирующего электрода R_1 критическое напряжение снижается, т.е. происходит более раннее зажигание короны. Этим обстоятельством объясняется использование тонкой проволоки, острых кромок и острий для создания коронного разряда.

В промышленных электрофилтрах при обычно применяемых значениях $R_1 = 0,001 \div 0,002$ м; $R_2 = 0,1 \div 0,15$ м значение критического напряжения находится в пределах 20 ÷ 40 кВ.

Примеры систем электродов, образующих резко неоднородные поля, представлены на рис. 5.2:

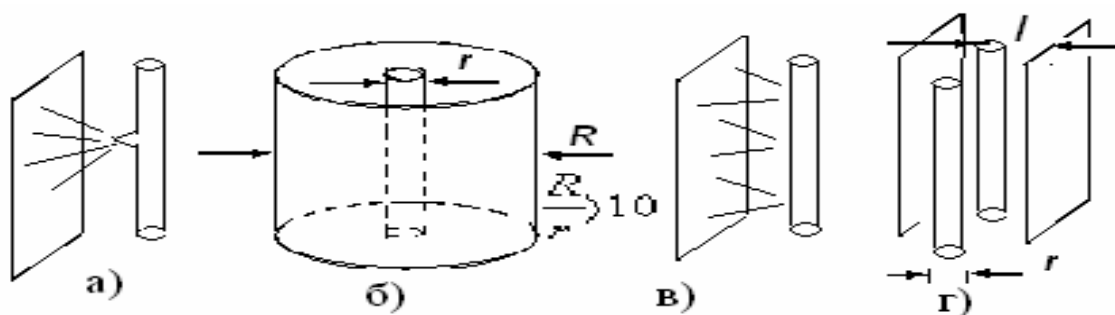


Рис. 5.2 – Системы электродов, образующие неоднородное электрическое поле:

а) острое-плоскость; б) концентрические цилиндры, $R/r > 10$;

в) провод-плоскость; г) ряд проводов между параллельными плоскостями,

Вольт-амперная характеристика электрофилтра – зависимость между приложенным к электродам напряжением и силой тока короны. По вольт-амперной характеристике оценивают работу электрофилтра.

Вид вольт-амперных характеристик зависит от многих факторов, в их числе:

- ❖ полярность приложенной к электродам разности потенциалов;
- ❖ конструктивные параметры (геометрические характеристики электродов);
- ❖ технологические параметры газа;
- ❖ количество содержащихся в газе взвешенных частиц и их свойства.

Примеры вольт-амперных характеристик электрофильтров представлены на рис. 5.3.

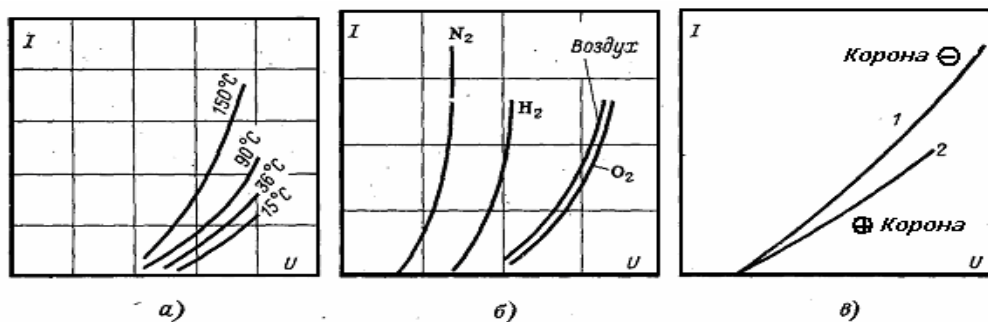


Рис. 5.3 – Характер зависимости вольт-амперных характеристик электрофильтров:

а)-от температуры газа; б)-от состава газа;

Для электрической очистки газов используются, как правило, отрицательная корона, т. е. на коронирующий электрод подается отрицательное напряжение выпрямленного тока. Это объясняется большей подвижностью отрицательных ионов по сравнению с положительными. Кроме того, при отрицательной короне удастся поддерживать более высокое напряжение без искрового пробоя между электродами.

5.2. Электрофильтры

Электрофильтры – широко распространенный тип аппаратов, предназначенных для очистки промышленных газов от твердых и жидких загрязняющих веществ, выделяющихся при различных технологических процессах.

Электрофильтры широко применяются почти во всех отраслях народного хозяйства: теплоэнергетике, черной и цветной металлургии, химии и нефтехимии, в строительной индустрии, при производстве удобрений и утилизации бытовых отходов, в атомной промышленности и др. Область применения электрофильтров непрерывно расширяется.

Преимущества электрофильтров:

- 1) высокая степень очистки, достигающая 99 %;
- 2) невысокое газодинамическое сопротивление аппарата - 150÷200 Па;
- 3) низкие энергетические затраты на улавливание частиц 0,3÷1,8 МДж (0,1—0,5 кВт. ч) на 1000 м³ газа;

- 4) возможность улавливания частиц широкого диапазона размером $0,1 \div 100$ мкм и менее;
- 5) возможность очистки газов с высокой начальной запыленностью (до 50 г/м^3);
- 6) возможность очистки газов с высокой температурой (до 500°C);
- 7) возможность работы аппаратов под давлением, под разрежением, а также в условиях воздействия различных агрессивных сред;
- 8) высокая производительность (до 1 млн. м³/час и более);
- 9) возможность полной автоматизации процесса.

К недостаткам электрофильтров относятся:

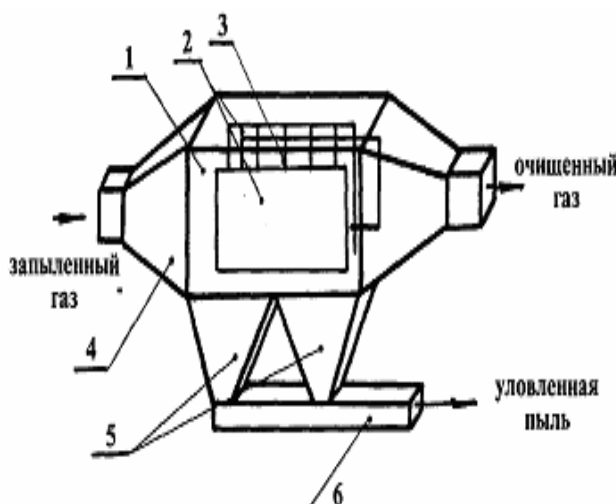
- 1) высокая чувствительность процесса фильтрации газов к отклонениям от заданных параметров технологического режима;
- 2) высокая чувствительность к незначительным механическим дефектам в активной зоне аппарата;
- 3) невозможность использования для очистки взрыво- и пожароопасных сред;
- 4) существенные размеры и высокая стоимость аппаратов;
- 5) высокие требования к квалификации обслуживающего персонала

5.2.1 Устройство электрофильтров

Установка для электрической очистки газов состоит из:

- электрофильтра;
- агрегатов питания;
- систем транспорта уловленной пыли.

Электрофильтр (рис. 5.4) состоит из металлического корпуса 1 с размещенными внутри него осадительными 2 и коронирующими 3 электродами. На входе в электрофильтр обычно устанавливается газораспределительное устройство 4, обеспечивающее равномерное распределение газов в активной зоне аппарата. В нижней части корпуса электрофильтр снабжается специальными устройствами для сбора (бункер) 5 и удаления (транспортер) 6 уловленной пыли.



*Рис. 5.4 – Электро-
фильтр:*

1-корпус;

2-осадительные электроды;

3-коронирующие электроды;

4-газораспределительное устройство;

5-бункеры для сбора пыли;

6-система транспортировки пыли.

Электрофилтры можно классифицировать по следующим признакам:

1. По расположению зон зарядки и осаждения:
 - а) *однозонные* – зарядка и осаждение частиц осуществляется в одной зоне (применяются для очистки промышленных газов);
 - б) *двухзонные* - зарядка и осаждение частиц происходит раздельно в ионизаторе и осадителе (применяются в системах тонкой очистки воздуха в системах вентиляции и кондиционирования);
2. По способу удаления осажденных на электродах частиц:
 - в) *сухие*;
 - г) *мокрые*.

В *сухих электрофилтрах* твердые частицы удаляются с электродов встряхиванием. Встряхивание осадительных электродов может производиться несколькими способами: встряхивание соударением, ударно-молотковое встряхивание, применение ударно-импульсных систем и вибрационных механизмов. Основной недостаток метода встряхивания – ускоренный усталостный износ конструкций электрофилтра.

Очищенный газ в сухих электрофилтрах должен иметь температуру, превышающую точку росы во избежание конденсации влаги. Появление влаги способствует образованию трудноудаляемых отложений и коррозию аппарата.

В *мокрых электрофилтрах* уловленные частицы смывают с электродов водой. Периодическая промывка предполагает кратковременную подачу большого количества промывочной жидкости в активную зону, при одновременном отключении электрофилтра от электропитания. Непрерывная промывка осуществляется непрерывной подачей промывной жидкости на работающие электроды. Количество жидкости равно минимально необходимому для создания сплошной водяной пленки для смыва осаждаемой пыли.

Температура газов, поступающих в мокрый электрофилтр, должна быть близка к точке росы. Аппараты могут применяться для улавливания тумана или капельной влаги из газового потока.

3. По направлению движения газа в электрофилтре:
 - а) *вертикальные*;
 - б) *горизонтальные*;
4. По числу последовательно установленных полей:
 - а) *однопольные*;
 - б) *многопольные*.

Наиболее распространенным типом электрофилтра является *многопольный горизонтальный филтр*. Наличие нескольких последовательно установленных полей улучшает условия улавливания частиц из-за возможности дифференциации электрического режима и обеспечения возможности поочередного встряхивания по полям.

Электроды - *коронирующие и осадительные* - являются основным технологическим элементом, решающим образом влияющим на работу электрофилтра.

Системы *осадительных* электродов выполняют двух типов:

- с *пластинчатыми электродами*;
- с *трубчатыми электродами*.

Осадительные электроды должны иметь гладкую поверхность (без острых углов) и полости, позволяющие встряхивать осевшую на них пыль и создавать повышенную напряженность поля. При наличии острых углов и кромок рабочее напряжение электрофильтра значительно снижается.

Конструкция электрода наряду с высокими электрическими показателями должна обеспечивать минимальный вторичный унос и иметь достаточную механическую прочность. Это необходимо для надежной работы аппарата в условиях повышенных температур и сильных вибраций. Один из основных недостатков плоских электродов - резкое повышение вторичного уноса при увеличении скорости выше 1 м/с. Поэтому плоские осадительные электроды в сухих электрофильтрах применяют при скорости газа не более 0,6—0,8 м/с.

Пластинчатые электроды могут быть листовые, прутковые, перфорированные, из профилированных элементов.

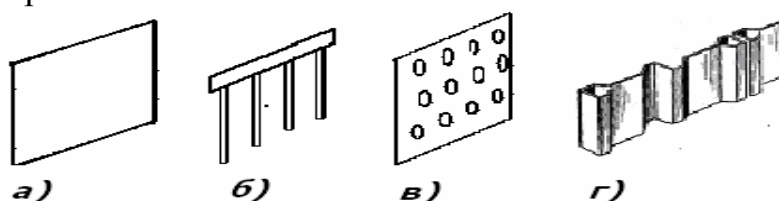


Рис. 5.5 – Пластинчатые электроды:
а)-лист; б)-пруток; в)-перфорированный лист; г)-профиль

Трубчатые электроды могут быть выполнены из специальных труб круглого сечения или шестигранные сотовые.

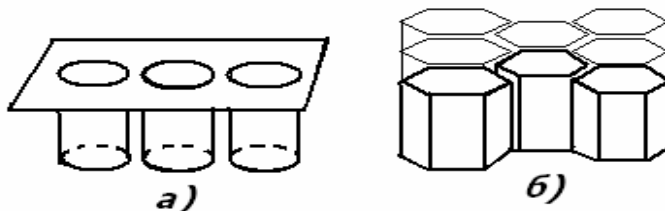


Рис. 5.6 – Трубчатые электроды:
а)-труба; б)-сот-шестигранник

Коронирующие электроды могут быть рамные (а) и свободно подвешенные (б), жесткие и нежесткие, с нефиксированными (гладкие) (в) и с фиксированными (г) точками разряда.

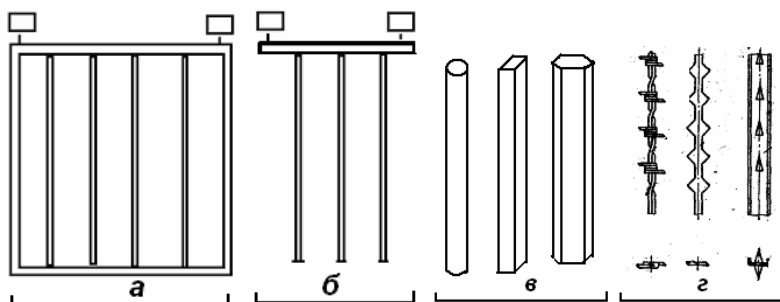


Рис. 5.7 – Коронирующие электроды

Коронирующие электроды с фиксированными точками разряда снабжены иглами, на которых и возникает коронный разряд. Меняя шаг игл и их высоту, можно получать определенное значение тока короны.

Изоляторы в электрофильтрах применяют для изолирования металлоконструкций от токонесущих частей коронирующей системы и одновременно они выполняют роль несущих конструкций. Изоляторы электрофильтров работают в тяжелых условиях: запыленная среда, сконденсированные пары воды и кислот, высокие температуры, значительные механические и электродинамическим нагрузки. Для надежной работы и защиты от воздействия среды изоляторы обычно устанавливают вне газового потока. В электрофильтрах используются кварцевые, фарфоровые, бумажно-бакелитовые, *ситалловые* (ситаллы – закристаллизованные стекла) изоляторы.

Одно из главных условий надежной работы изоляторов и электрофильтров – поддержание температуры поверхности изоляторов выше точки росы во избежание выделения на них электропроводного конденсата. В сухих электрофильтрах изоляторы подогревают проходящими через электрофильтр дымовыми газами. В мокрых электрофильтрах применяют постоянный подогрев изоляторов.

При улавливании электропроводной пыли (уголь, сажа) необходимо исключить запыление поверхности электродов. Для этого их устанавливают в специальные изоляторные коробки с наддувом чистого воздуха.

Бункеры электрофильтров служат для накопления уловленной пыли. Число бункеров определяют по производительности аппарата. Для удобства монтажа и эксплуатации электрофильтра, как правило, каждое поле электрофильтра снабжают бункером.

5.2.2. Расчет эффективности электрофильтров

Улавливаемая в электрофильтре частица получает электрический заряд и под действием сил электрического поля приобретает составляющую скорости в сторону осадительного электрода, которая называется *скоростью дрейфа*.

Чтобы осадить частицу на поверхность электрода необходимо обеспечить определенное соотношение между скоростью газа, скоростью дрейфа частицы и межэлектродным промежутком.

В мокрых электрофильтрах при достижении частицами электродов процесс улавливания можно считать законченным. Частицы, будучи смоченными, прилипают к электродам, и смываются водой, отдавая ей свой заряд вследствие хорошей проводимости.

В сухих электрофильтрах на процесс очистки влияет вторичный унос осевших на электродах частиц и унос частиц при встряхивании электродов.

Теоретическое выражение для парциальной эффективности электрофильтра было предложено *Дейчем*:

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{2\omega L}{WR}} \quad \text{для трубчатого электрофильтра;} \quad (5.1)$$

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{\omega L}{WH}} \text{ - для пластинчатого электрофильтра;} \quad (5.2)$$

где w - скорость дрейфа частиц, м/с:

W - скорость газа в активном сечении, м/с;

L - активная зона электрофильтра, м;

R - радиус трубчатого осадительного электрода, м;

H - расстояние между коронирующим электродом и пластинчатым осадительным электродом, м.

Введем понятие удельной поверхности осаждения $-f$:

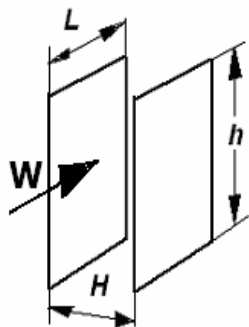


Рис. 5.8 – Схема осадительных электродов электрофильтра

$$f = \frac{S}{Q} = \frac{Lh}{WHh} = \frac{L}{WH} \quad (5.3)$$

где S - площадь поверхности осаждения осадительных электродов;

Q - объемный расход очищаемых газов.

Подставив (5.3) в (5.2), получим

$$\eta_n = 1 - e^{-wf} \quad (5.4)$$

Из формулы (5.4) следует, что степень очистки в электрофильтре зависит от скорости дрейфа и удельной поверхности осаждения.

Приравнивая силу взаимодействия между электродом и зарядом частицы, с одной стороны, и силу аэродинамического сопротивления движению частицы в газе, - с другой, – можно определить теоретически скорость движения частицы к осадительному электроду, т.е. *скорость дрейфа*:

Для крупных частиц ($d_q > 1 \text{ мкм}$):

$$w = 0,118 * 10^{-10} \frac{E^2 r_q}{\mu}, \text{ м/с} \quad (5.5)$$

-скорость дрейфа частицы прямо пропорциональна ее размеру и квадрату напряженности электрического поля.

Для мелких частиц ($d_q \leq 1 \text{ мкм}$):

$$w = 0,17 * 10^{-11} \frac{E C_{\kappa}}{\mu}, \text{ м/с,}$$

где C_{κ} – поправка Кеннингема-Милликена: $C_{\kappa} = 1 + (A\lambda/r)$, $A = 0.815 - 1,63$ (численный коэффициент);

λ – длина среднего свободного пробега молекул газа, м ($\lambda = 10^{-7} \text{ м}$).

Теоретический расчет степени очистки мало надежен.

На практике формулу (5.4) используют, когда есть опыт эксплуатации аналогичного электрофильтра в аналогичных условиях. Исходя из фактического значения η , в фильтре-аналоге находят w и используют ее для расчета η нового электрофильтра.

Общую степень очистки в электрофильтре определяем по формуле

$$\eta = 1 - \exp(-K_{yn} A \beta^{0,42}),$$

где K_{yn} – обобщенный коэффициент вторичного уноса;
 A, β – безразмерные параметры.

$$\beta = \frac{\varepsilon_o E^2 d_m L}{W K_w \mu H},$$

где ε_o – диэлектрическая постоянная, $K^2/\text{нм}^2$;
 E – напряженность поля у осадительного электрода, В/м;
 d_m – медианный размер частиц, м;
 L – активная длина электрофильтра, м;
 W – средняя скорость газа в активном сечении, м/с;
 K_w – коэффициент неравномерности распределения газового потока;
 μ – динамическая вязкость газа, н с/м²;
 H – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м.

$$K_{yn} = 1 - 0,275 k_1 k_2 k_3,$$

где k_1 – коэффициент относительной высоты осадительных электродов:

$$k_1 = \left(\frac{h}{h_o} \right)^{0,51},$$

k_2 – коэффициент относительной скорости газа:

$$k_2 = \left(\frac{W}{W_o} \right)^{0,35},$$

k_3 – коэффициент относительной пылеемкости электродов:

$$k_3 = -1,72 \frac{m}{m_o},$$

$k_1 \div k_3$ – определяем с учетом соответствующих базовых значений:

$$h_o = 8 \text{ м}; \quad W_o = 1 \text{ м/с}; \quad m_o = 1 \text{ кг/м}^2.$$

Параметр А зависит от отношения площадей активной и неактивной зон электрофильтра, среднего квадратичного отклонения размеров частиц $\sigma_{\text{ч}}$ и параметра к:

$$k = \frac{T}{d_m} \left(\frac{4,15 \cdot 10^{-7}}{P} + \frac{5,47 \cdot 10^{-4}}{E} \right),$$

где T – температура газа, °K;

d_m – медианный размер частиц;

P – давление газа, мм.рт.ст.

Параметр А определяют по диаграммам.

5.2.3 Факторы, влияющие на эффективность электрофильтра

1. Скорость газа в активном сечении аппарата является определяющим фактором. Она связана с активной длиной электрофильтра параметром «время пребывания газопылевого потока в аппарате» или удельной поверхностью осаждения электрофильтра f - формула(5.3).

Из формулы Дейча (5.1-5.2) следует, что для обеспечения необходимой степени очистки увеличение скорости газа может быть компенсировано увеличением активной длины электрофильтра.

Однако, превышение определенного предела скорости независимо от длины электрофильтра не может предотвратить снижение его эффективности. Это связано с резким увеличением вторичного уноса пыли с электродов. Увеличение скорости газа в сухом электроfiltре с 1,5 до 3 м/с приводит к возрастанию уноса пыли при встряхивании в 8-10 раз. Поэтому для фильтров с плоскими осадительными электродами скорость газа принимается обычно в пределах до 0,8÷1,0 м/с. В сухих электрофильтрах с профилированными электродами верхний предел скорости газа не превышает обычно 1,5÷1,7 м/с.

В соответствии с формулой Дейча эффективность улавливания и скорость газа связаны экспоненциальной зависимостью (рис. 5.9). Это означает, что местное увеличение скорости запыленного газового потока даже на 20÷30% от ее среднего значения вызовет резкое снижение эффективности.

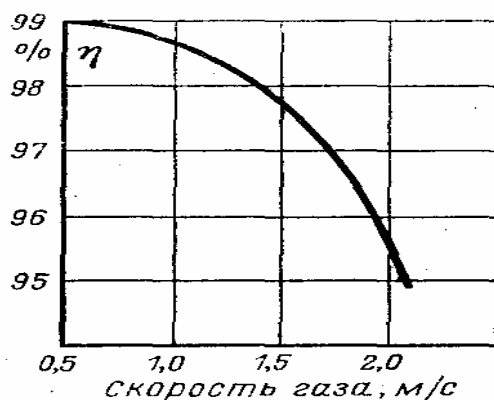


Рис. 5.9 – Зависимости степени улавливания электрофильтров от скорости газа

Для равномерного распределения газа в активном сечении электрофильтра применяют газораспределительные решетки, направляющие лопатки.

2. *Электрические параметры электрофильтра* – определяющим из них является напряженность электрического поля E . Согласно (5.5) скорость дрейфа прямо пропорциональна напряженности электрического поля. Напряженность определяется величинами U и H :

$$E \approx \frac{U - \text{напряжение_между_электродами}}{H - \text{межэлектродный_промежуток}}.$$

Наилучшие условия для осаждения частиц создаются при поддержании *максимального напряжения* на электродах, которое зависит от:

- а) точности центровки электродов;
 - б) параметров пылегазового потока, определяющих пробойное напряжение;
 - в) качества электротехнического оборудования (его способность автоматически поддерживать на электродах максимальное напряжение, близкое к пробойному).
3. *Концентрация и дисперсность частиц*. Большая входная концентрация частиц пыли (их объемный заряд) приводит к затуханию тока коронного разряда, т.е. возникает «запирание или затухание короны».

В чистом газе ток короны всегда больше, чем в запыленном.. Это объясняется тем, что скорость ионов ($W_{и}=60\div100\text{м/с}$) значительно выше скорости заряженных пылевых частиц ($W_{п}=0,2\div0,4\text{ м/с}$). Поэтому появление заряда на частицах пыли уменьшает ток короны.

В поле электрофильтра ток короны можно представить состоящим из двух слагаемых:

$$i_o = i_u + i_n,$$

где i_u, i_n – токи, вызываемые движущимися ионами и движущимися частицами пыли соответственно.

Вследствие малой скорости движения пылевых частиц составляющая тока i_n в *нормально работающем электрофильтре* не превышает $1\div2\%$ общего тока. С повышением запыленности газа ток короны уменьшается и при концентрации $25\text{-}35\text{ г/м}^3$ может упасть почти до нуля – наступает «запирание короны». Таким образом, «запирание короны» наступает, когда объемный заряд частиц пыли становится равным объемному заряду генерируемых ионов, т.е. ионная составляющая тока короны обращается в нуль.

Решающую роль в этом процессе играет *счетная концентрация* частиц – количество частиц в единице объема. Поэтому при улавливании очень мелких частиц затухание короны может происходить при небольших входных массовых концентрациях.

Фракции пыли размером $0,1\div0,3\text{ мкм}$ хуже всего улавливаются в электрофильтре, т.к. эти частицы имеют минимальную скорость дрейфа.

Для предотвращения запирания короны рекомендуется:

- а) *снижения входной запыленности (механическая предочистка);*
- б) *повышение рабочего напряжения на электродах;*
- в) *уменьшение скорости газа в электрофильтре;*
- г) *применение многопольных электрофильтров.*

4. *Удельное электрическое сопротивление пыли* – ρ_v – оказывает существенное влияние на процесс осаждения и удаления пыли из

электрофильтра. По величине удельного электрического сопротивления пыли делятся на три группы:

- 1 - низкоомные пыли – $\rho_v < 10^2 \text{ Ом*см}$;
- 2 - пыли с $\rho_v = 10^2 \div 10^8 \text{ Ом*см}$;
- 3 - высокоомные пыли – $\rho_v > 10^8 \text{ Ом*см}$.

Нормальный процесс осаждения и удаления с электродов характерен для пылей второй группы. При осаждении на электродах эти пыли разряжаются не сразу, а через некоторое время. Этого времени достаточно для накопления слоя и формирования из мелких осажденных частиц агломератов под действием электростатических и аутогезионных сил. Размер агломератов обеспечивает попадание в бункер значительной части пыли при встряхивании и незначительный вторичный унос.

Низкоомные пыли мгновенно разряжаются, попадая на электрод. Пылинки не агломерируются за счет аутогезионных сил и большая часть осажденной пыли вновь уносится газовым потоком.

Высокоомные пыли, осаждаясь на электроде, образуют пористый изолирующий слой. При превышении некоторого критического напряжения в слое происходит электрический пробой пористого слоя - образуется тонкий канал, заполненный положительными ионами. Развивается мощный обратный коронный разряд («обратная корона»), действующий навстречу основному. Эффективность электрофильтра, работающего в режиме обратной короны, резко снижается.

5. Свойства очищаемого газа. На процесс очистки в электрофильтрах влияют следующие параметры газа:

- 1- температура, t ;
- 2- влажность, d ;
- 3- плотность, ρ ;
- 4- химический состав (микропримеси, например SO_3).

Влияние температуры очищаемого газа и его влажности на эффективность улавливания в сухих электрофильтрах определяется связью этих параметров с пробивным напряжением и удельным электрическим сопротивлением слоя пыли (рис. 5.10).

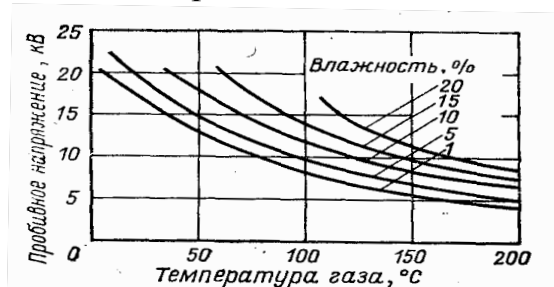


Рис. 5.10 – Зависимость пробивного напряжения от температуры и влажности газа

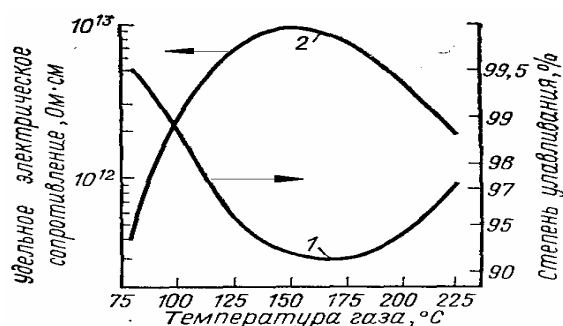


Рис. 5.11 – Зависимость удельного электросопротивления и степени очистки от температуры газа

Значение пробивного напряжения возрастает с увеличением плотности газа, поэтому при снижении температуры пробивное напряжение увеличивается, обеспечивая устойчивую работу электрофильтра при более высоком напряжении.

Водяные пары в газе увеличивая его плотность, тем самым увеличивают пробивное напряжения, обеспечивая лучшие условия улавливания.

Удельное электрическое сопротивление слоя пыли является одним из важнейших факторов, от которых зависит эффективность электрофильтра.

Удельное электрическое сопротивление материала обычно *понижается с ростом температуры* (рис. 5.11). Поэтому для снижения удельного электрического сопротивления пыли ниже уровня, соответствующего обратной короне, а некоторых случаях достаточно повысить температуру газа.

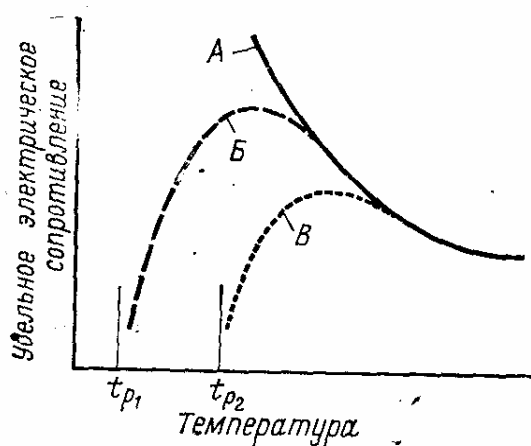


Рис. 5.12 – Влияние температуры и точки росы газа на удельное электросопротивление слоя пыли.

А – сухая пыль;

Б – адсорбированный поверхностью пыли компонент с точкой росы t_{p1} ;

В – адсорбированный поверхностью пыли компонент с точкой росы t_{p2} .

($T_{max}=170-300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

На удельное электрическое сопротивление слоя пыли влияет также способность поверхности частиц адсорбировать компоненты, обладающие низким удельным сопротивлением (вода и серный ангидрид). Адсорбция этих компонентов резко увеличивается, а удельное электрическое сопротивление падает, когда температура газа приближается к точке росы: кривая Б соответствует точке росы t_{p1} , кривая В - точке росы t_{p2} . (рис. 5.12)

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления слоя описывается кривой с максимумом. Обычно этот максимум лежит в области температур $170\div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Значение удельного электрического сопротивления можно уменьшить тремя способами:

- 1- повысить температуру газа;
- 2- снизить температуру газа;
- 3- приблизить точку росы к рабочей температуре газа (путем увеличения в газах компонентов, повышающих эту точку - водяных паров, серного ангидрида, аммиака и др.).

Перечисленные способы применяются на практике и называются *кондиционированием газов* перед электрофильтром.

Степень улавливания частиц зависит от их размера: практика показывает, что в интервале размеров частиц от 1 до $20\div 40\text{ }\mu\text{m}$ эффективность улавливания возрастает, а при дальнейшем увеличении размера частиц несколько снижается.

5.2.4. Электрическое оборудование электрофильтров

Питание электрофильтров осуществляется *постоянным* током высокого напряжения (60-80 кВ). Для преобразования переменного тока обычной частоты (50Гц) и низкого напряжения (380 в) используют электрические агрегаты питания электрофильтров мощностью 20-150 квт. Каждый агрегат состоит из повысительного трансформатора, выпрямителя, регулятора напряжения и пульта управления.

Для повышения напряжения в электроагрегатах используют специальные, в основном, однофазные трансформаторы. Условия работы электрофильтров предъявляют особые требования к конструкции трансформатора – возможность длительно выдерживать электродинамические перегрузки, возникающие при пробоях в электрофильтрах.

Для преобразования переменного тока в постоянный на вторичной обмотке трансформатора используются полупроводниковые выпрямители.

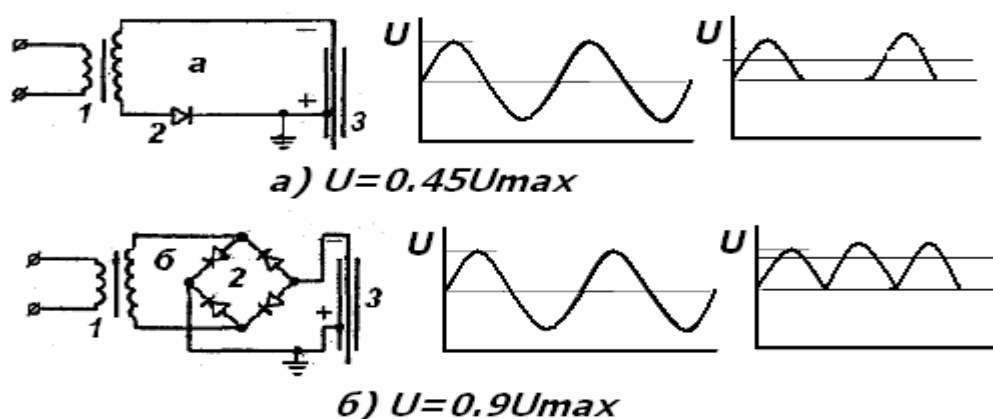


Рис. 5.12 – Схемы полупроводниковых выпрямителей:

а-однополупериодная схема;

в-двухполупериодная схема;

1- трансформатор; 2-выпрямитель; 3-электрофильтр.

В связи с непрерывным изменением температуры, влажности, запыленности и других параметров газового потока электрический режим работы электрофильтров непрерывно изменяется. Незначительное снижение рабочего напряжения (на 1%) вызывает существенное уменьшение тока короны (на 5%), в результате чего снижается эффективность электрофильтра.

Максимально возможное (по условиям пробоя) напряжение на электродах в современных агрегатах питания поддерживается автоматически. При этом автоматический электрический режим работы электрофильтра осуществляется следующими методами:

- а) поддержанием напряжения на границе дугового пробоя;
- б) по заданному числу искровых разрядов;
- в) по максимальному среднему напряжению на электродах;

Метод а: напряжение на электродах автоматически плавно повышается до возникновения пробоя. В момент пробоя напряжение отключается на 0,5÷3 с или резко снижается до величины, обеспечивающей гашение дуги. За время от-

ключения напряжение автоматически снижается на небольшую величину, так чтобы при повторном включении не возникало дугового разряда. Далее напряжение вновь плавно поднимается до наступления пробоя, после чего опять следует отключение, после чего цикл повторяется.

При таком периодическом способе регулирования большую часть времени электрофильтр работает в безыскровой зоне напряжения. В результате этого рабочее напряжение на электродах ниже максимально возможного уровня.

Практика показала, что работа в зоне искровых разрядов возможна до тех пор, пока они не переходят в устойчивый дуговой пробой.

Метод б: при работе в зоне искровых разрядов рабочее напряжение близко к максимально возможному и, следовательно, эффективность очистки наиболее высока. Установлено, что оптимальная величина напряжения определяется числом искровых разрядов в минуту. Наиболее выгодным является $40 \div 70$ искровых разрядов в минуту. При большом числе искровых разрядов эффективность работы электрофильтра снижается из-за увеличения потерь мощности в режиме частых искровых пробоев.

Недостатком системы регулирования по числу искровых разрядов является работа по заданному постоянному числу искровых разрядов. Однако оптимальная частота искровых разрядов меняется с изменением параметров газового потока и пробивной прочности разрядного промежутка, на которые система *не реагирует*.

Метод в: этого недостатка лишена экстремальная система регулирования благодаря поддержанию *максимального среднего напряжения* на электродах. С повышением первичного напряжения трансформатора среднее значение напряжения на электродах сначала линейно возрастает, достигает максимума, а затем начинает убывать за счет роста интенсивности искровых разрядов. Максимальное среднее напряжение на электродах соответствует оптимальному числу искровых разрядов в межэлектродных промежутках электрофильтра. Поэтому поддержание на максимальном уровне значения среднего напряжения на электродах соответствует режиму работы электрофильтра при оптимальном числе искровых разрядов. Оптимальное число искровых разрядов изменяется с изменением параметров газового потока в широких пределах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник по пыле- и золоулавливанию./ М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др. Под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
2. Экология города: Учебник / Под ред. Ф. В. Стольберга. – К.: Либра, 2000. – 464 с.
3. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів./ Затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України від 19.06.1996 № 173. – К., 1996.
4. Старк С. Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. – М.: Металлургия, 1977. – 328 с.
5. Алиев Г. М. – А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Справочное издание. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

Навчальне видання

БЕКЕТОВ Володимир Єгорович
ЄВТУХОВА Галина Петрівна

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни

ПРИКЛАДНА АЕРОЕКОЛОГІЯ
Модуль 4 «Апарати сухої очистки газів»

*(для студентів 4-го курсу (7 семестр) денної та 4 курсу (8 семестр)
заочної форм навчання напрям 6.040106 «Екологія, охорона
навколишнього середовища та збалансоване природокористування»)*
(рос. мовою)

Відповідальний за випуск *А. М. Буткевич*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2013, поз. 15 Л

Підп. до друку 11.10.2013 р.	Формат 60×84 /16
Друк на різнографі.	Умов. друк. арк.3,8
Зам. №	Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4064 від 12.05.2011р.